

Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías  
Industriales  
Curso académico 2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

# “Simulación del aprovechamiento del recurso eólico urbano con tecnología Vortex Bladeless”

---

Javier García González

Tutor

Antonio Soria Verdugo

Lugar y fecha de presentación prevista

Universidad Carlos III, Leganés    Aula 7.2.J03

03/07/2019    9:30



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## Resumen

El panorama energético internacional apuesta por la reducción de **emisiones** a través de la electrificación al mismo tiempo que prevé un aumento continuado de la demanda. Esta situación abre paso a las fuentes de **energía renovables** y a la innovación en el ámbito de la generación eléctrica. La tecnología desarrollada por Vortex Bladeless permite aprovechar el recurso eólico mediante un dispositivo que trabaja bajo condiciones de turbulencia, con una sección circular que permite aprovechar el **viento** en cualquier dirección y cuyo tamaño permite utilizarlo en zonas urbanas.

A través de este estudio se simulan las curvas de **potencia** para los aerogeneradores Vortex Bladeless y se analiza su **producción** teórica a lo largo de un año en distintas localizaciones y bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Finalmente es analizado su coste e impacto medioambiental para poder valorar su posible entrada en el mercado actual.

**Palabras clave:** emisiones, energía renovable, viento, potencia, producción

## Abstract

The international energy landscape is committed to reduce **emissions** through electrification while forecasting a continuous increase in demand. This situation opens the way for **renewable energy** sources and for innovation in electricity generation. The technology developed by Vortex Bladeless allows to take advantage of the wind resource through a device that works under turbulent conditions, with a circular section that makes it able to work with **wind** coming from any direction and whose size allows to use it in urban areas.

Through this study, **power** curves for Vortex Bladeless wind turbines are simulated and their theoretical **production** is analysed over a year in different locations and under different operating conditions. Finally, its cost and environmental impact are analysed in order to assess its possible entry into the current market.

**Key words:** emissions, renewable energy, wind, power, production



## Índice de Contenido

1)	SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL.....	1
1.1)	Situación energética actual a nivel global .....	1
1.2)	Situación energética actual a nivel europeo .....	5
1.3)	Situación energética actual en España.....	10
1.3.1)	Mini/micro eólica en España.....	12
1.4)	Marco regulador.....	13
1.4.1)	Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.....	13
1.4.2)	Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. ....	16
2)	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	18
3)	INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	19
3.1)	Tipos de aerogeneradores.....	19
3.2)	Aerogeneradores Vortex Bladeless.....	21
3.2.1)	Dimensionado del dispositivo .....	23
3.2.2)	Sistema de ajuste o sintonizado.....	26
3.2.3)	Conversión de energía en electricidad.....	29
3.2.4)	Fatiga de materiales .....	32
3.2.5)	Densidad de potencia.....	33
3.2.6)	Especificaciones técnicas .....	34
4)	SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	36
4.1)	Potencia disponible en el viento.....	36
4.1.1)	Weibull .....	40
4.2)	Rendimiento del aerogenerador.....	42
4.3)	Turbulencias en el campo eólico.....	46
4.4)	Emplazamiento del campo eólico .....	50
4.4.1)	Casos Leganés .....	52
4.4.2)	Caso Cádiz .....	63
5)	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
5.1)	Análisis económico.....	67
5.1.1)	Cálculo de costes.....	67
5.1.2)	Levelized Cost of Energy (LCoE) .....	70
5.2)	Análisis medioambiental .....	73
6)	CONCLUSIONES .....	76

Bibliografía .....	78
Anexo A .....	A
Anexo B .....	B
Anexo C .....	C
Anexo D .....	D

## Índice de figuras

Fig. 1. 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	2
Fig. 1. 2 Crecimiento anual del consumo final por fuente de energía .....	3
Fig. 1. 3 Incremento del parque eólico mundial 2012-2023 .....	4
Fig. 1. 4 Producción de energía renovable en Europa 2016 .....	9
Fig. 1. 5 Producción eléctrica con energías renovables en España .....	12
Fig. 3. 1 Diferentes tipos de aerogenerador .....	19
Fig. 3. 2 Fenómeno de desprendimiento de vórtices .....	21
Fig. 3. 3 Representación gráfica del límite de Betz .....	22
Fig. 3. 4 Mástil del dispositivo .....	23
Fig. 3. 5 Estátor del dispositivo .....	23
Fig. 3. 6 Varilla del dispositivo .....	24
Fig. 3. 7 Nomenclatura de las dimensiones .....	24
Fig. 3. 8 Sistema magnético de amortiguación .....	26
Fig. 3. 9 Imanes confinados .....	27
Fig. 3. 10 Rango de lock-in gracias al sistema de amortiguación .....	28
Fig. 3. 11 Relación Strouhal-Reynolds .....	29
Fig. 3. 12 Componentes del alternador .....	30
Fig. 3. 13 Curva de potencia teórica .....	34
Fig. 4. 1 Perfil del mástil del aerogenerador .....	37
Fig. 4. 2 Potencia disponible en el viento (Vortex 10 m) .....	39
Fig. 4. 3 Potencia disponible en el viento (Vortex 2,75 m) .....	40
Fig. 4. 4 Lecturas para el cálculo del amortiguamiento .....	42
Fig. 4. 5 Valor experimental de $C_p$ .....	43
Fig. 4. 6 Curva de potencia aerogenerador 2,75 m .....	45
Fig. 4. 7 Comparativa curvas de potencia .....	45
Fig. 4. 8 Planteamiento gráfico estudio Ren-Jie Jiang [23] .....	46
Fig. 4. 9 Mediciones estudio Ren-Jie Jiang [23] .....	47
Fig. 4. 10 Planteamiento gráfico estudio Alper Cesur [24] .....	48
Fig. 4. 11 Resultados estudio Alper Cesur [24] .....	48
Fig. 4. 12 Mapa europeo de vientos [11] .....	50
Fig. 4. 13 Velocidad y densidad de potencia del viento en España a 30 metros de altura [25] .....	51
Fig. 4. 14 Velocidad del viento en Madrid a 80 metros de altura [25] .....	52
Fig. 4. 15 Toma aérea superficie utilizable CMU Fernando Abril Martorell .....	53
Fig. 4. 16 Distribución de Weibull a 13,375 metros de altura .....	55
Fig. 4. 17 Potencia anual generada a distintas velocidades del viento .....	56
Fig. 4. 18 Distribución de Weibull a 17 metros de altura .....	57
Fig. 4. 19 Toma aérea superficie utilizable Universidad Carlos III, Leganés .....	58
Fig. 4. 20 Toma aérea superficie no utilizable Universidad Carlos III, Leganés .....	58
Fig. 4. 21 Toma aérea superficie ocupada por placas solares Universidad Carlos III, Leganés .....	58
Fig. 4. 22 Distribución de Weibull a 17,375 metros de altura .....	59
Fig. 4. 23 Rendimiento de los paneles solares en la Universidad Carlos III, Leganés .....	61
Fig. 4. 24 Irradiación disponible en Madrid [28] .....	62
Fig. 4. 25 Velocidad del viento en Cádiz a 80 metros de altura [25] .....	63
Fig. 4. 26 Distribución de Weibull a 17,375 metros de altura .....	64
Fig. 4. 27 Distribución de Weibull a 21 metros de altura .....	64
Fig. 4. 28 Toma aérea de la superficie utilizable en Cádiz .....	65

Fig. 5. 1 Curva de potencia teórica	66
Fig. 5. 2 Curva de potencia aerogenerador 2,75 m	66
Fig. 5. 3 LCoE dispositivos Vortex Bladeless según el tipo de interés	71
Fig. 5. 4 LCoE de distintas fuentes de energía	72
Fig. 5. 5 Mix eléctrico español 2018	73
Fig. 5. 6 Emisiones por tipo de fuente de energía	74

## Índice de tablas

TABLA 1. 1 FUENTE DE ENERGÍA Y COSTE MEDIO	5
TABLA 3.1 POTENCIA INSTALADA DE LOS AEROGENERADORES	20
TABLA 3.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	35
TABLA 4.1 RELACIÓN DE ALTURA	36
TABLA 4.2 COEFICIENTES DE FRICCIÓN [17]	39
TABLA 4.3 FUNCIÓN GAMMA [19]	41
TABLA 4.4 COEFICIENTE DE POTENCIA	44
TABLA 4.5 RESULTADOS ALPER CESUR [24]	49
TABLA 4.6 WEIBULLL	54
TABLA 5.1 RESULTADOS SIMULACIONES	67
TABLA 5.2 MATERIALES Y COSTES	69
TABLA 5.3 PARÁMETROS LCoE	71



## **1) SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL**

### **1.1) Situación energética actual a nivel global**

En la actualidad global, el aumento de los ingresos y el aumento poblacional de aproximadamente 1700 millones de personas, el cual se ve reflejado principalmente en áreas urbanas de economías en desarrollo, deriva en un aumento estimado de la demanda energética mundial de más de un 25% para 2040. De hecho, de no ser por el aumento de la eficiencia energética, el crecimiento en la demanda podría ser hasta dos veces mayor. Si nos remontamos al año 2000, Europa y Norteamérica representaban más del 40% de la demanda energética mundial y Asia con sus economías en vías de desarrollo cerca del 20%. Dadas las predicciones a 2040, esta situación se invierte con India a la cabeza, liderando el hecho de que la mayor parte del crecimiento procede de las economías en desarrollo.

Este desplazamiento hacia Asia del consumo energético afecta a la tecnología, los combustibles e incluso las inversiones energéticas. El crecimiento del mercado asiático se ve reflejado en todos los sectores relacionados con la energía, dónde Asia representa: [1]

- 50% del crecimiento mundial de gas natural.
- 60% del aumento de las energías solar fotovoltaica y eólica.
- 80% del incremento del petróleo.
- 100% del crecimiento tanto de energía nuclear como de carbón.

Como muestra de esta tendencia actualmente seis de las diez mayores empresas eléctricas son chinas mientras que hace 15 años todas ellas eran europeas.

Por su parte, Estados Unidos representa más de la mitad del crecimiento de producción mundial previsto para 2025 en petróleo y gas.

Todas estas nuevas tendencias introducen un nuevo sistema cambiante de oferta, demanda y tecnología, dentro del cual tienen cabida nuevas formas a escala local de producción energética. Los modelos de suministro de energía distribuidos están ganando terreno gracias a la digitalización y al aumento de la rentabilidad de tecnologías renovables. [1]

Dentro de este nuevo paradigma energético toma gran importancia la sostenibilidad, siendo uno de los focos fundamentales a alcanzar convergiendo el abaratamiento de las tecnologías renovables con las aplicaciones digitales y el papel creciente de la electricidad.

Tras el período de tres años en los que se estabilizaron las emisiones, en 2017 las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía incrementaron en un 1,6% y se estima que ese crecimiento se mantenga en 2018, alejándose de la trayectoria necesaria para cumplir con los objetivos climáticos. A este respecto se establecieron los objetivos mundiales de desarrollo sostenible impulsados por las Naciones Unidas que aúnan el desarrollo sostenible con muchas posibles medidas relacionadas con el ámbito energético:

# **OBJETIVOS** **DE DESARROLLO SOSTENIBLE**



*Fig. 1. 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible*

En relación con la industria energética se pueden apreciar los ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), 13 (Acción por el clima)...

El sector eléctrico está llamado a liderar la transición energética hacia la reducción de emisiones, a día de hoy representa cerca del 20% del consumo final mundial, pero se espera un gran aumento. El crecimiento en la demanda de electricidad aparece de forma modesta en las economías avanzadas, pero sigue habiendo un gran espacio para inversiones dada la modernización de infraestructuras y el cambio del mix energético. Gran parte del crecimiento eléctrico está sujeto a su alcance a la hora de suministrar calor para fábricas, oficinas, hogares y de su actuación en el sector del transporte. Actualmente un tercio del capital invertido en suministro energético a nivel mundial va dirigido a redes eléctricas y generación en países en desarrollo.

La mayor prospectiva de evolución la tiene la energía solar fotovoltaica, que se estima que supere en capacidad instalada a la eólica antes de 2025, a la hidroeléctrica en 2030 y al carbón en torno a 2040. Este desarrollo se ve incrementado por el papel de la energía fotovoltaica distribuida en hogares y empresas. Esta energía está bien posicionada para superar a las actuales plantas de carbón en el futuro, pero actualmente sigue necesitando políticas de apoyo para competir con las plantas de generación térmica. [1]

La flexibilidad en los sistemas eléctricos toma un papel de importancia dado el aumento de la energía eólica y solar fotovoltaica con el objetivo de mantener un suministro seguro. La principal fuente de flexibilidad sigue siendo las centrales eléctricas convencionales apoyadas por sistemas de almacenamiento, nuevas interconexiones y medidas de respuesta de la demanda. Aunque mirando al futuro, el coste del almacenamiento en baterías desciende a gran velocidad y su competencia con las

centrales de punta de gas aumenta a la hora de gestionar fluctuaciones de la oferta y la demanda a corto plazo.

Con este nuevo balance en el mix energético falta por analizar el papel de las centrales nucleares, que en principio permanecen alrededor del 10% de la generación mundial, siendo actualmente la segunda fuente de generación eléctrica de bajas emisiones de CO<sub>2</sub> tras la energía hidroeléctrica. Aunque solo un tercio del parque nuclear actual en las economías avanzadas tiene menos de 30 años, por lo que la extensión o clausura de gran parte del parque actual tendrá una gran influencia en las emisiones, seguridad energética e inversiones. [1]

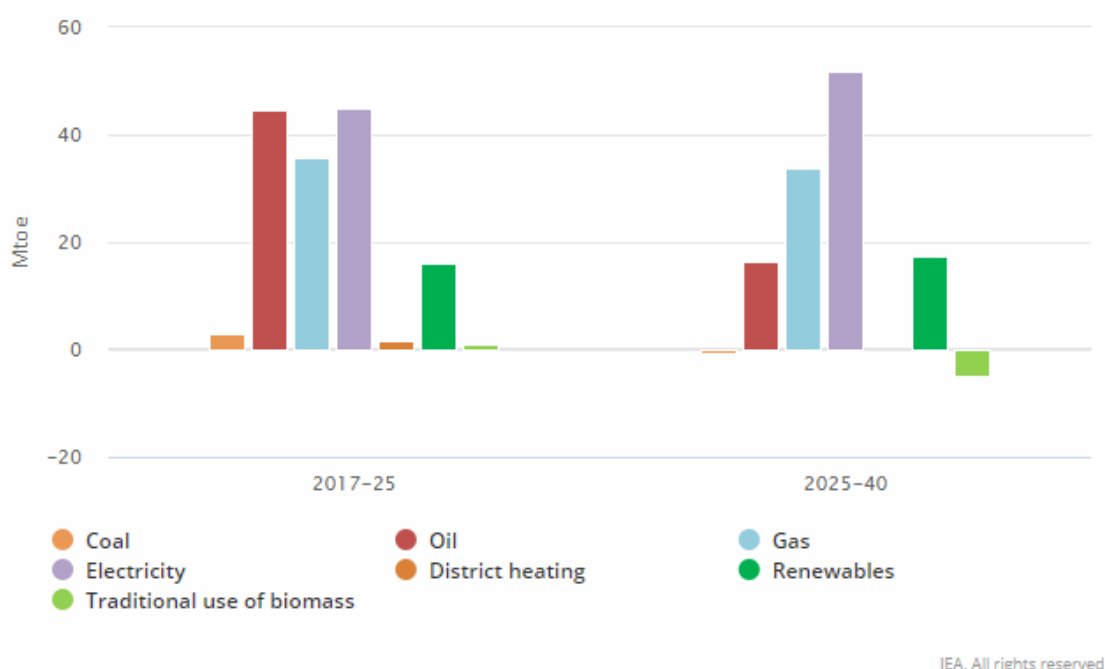


Fig. 1. 2 Crecimiento anual del consumo final por fuente de energía

Con el nivel de electrificación previsto, cabe preguntarse si seremos capaces de manejar tal nivel de electricidad, cuya demanda puede aumentar entre un 60 y un 90% de aquí a 2040 dado el auge del acceso a la electricidad, la calefacción eléctrica a través de bombas de calor y la movilidad eléctrica, donde se estima que cerca de la mitad de la flota de vehículos se electrifique para 2040. Aunque todavía existen limitaciones para la navegación, aviación y el transporte de mercancías de larga distancia por carretera. La electrificación presenta muchos beneficios, principalmente la reducción de la contaminación, pero esto solo será así si está acompañado de un desplazamiento en el mix energético hacia energías limpias; de lo contrario las emisiones simplemente se desplazarán desde el uso final a la generación eléctrica. Como se ha mencionado anteriormente, la energía solar fotovoltaica y eólica constituyen una fuente de energía de bajas emisiones, pudiendo utilizar el mercado del gas como apoyo gracias también a la expansión del gas natural licuado (GNL). [1]

La energía eólica tiene un crecimiento previsto de 324 GW llegando a 839GW en 2023, donde la energía offshore corresponde a un 10% de esta generación. Sin embargo, estas plantas de generación offshore suponen la mayor fuente de crecimiento de

producción eólica, centradas en la Unión Europea y Asia (especialmente en China). También en la Unión Europea, el crecimiento de los campos eólicos onshore está liderado por Alemania, Francia, España e Italia.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, las inversiones en instalaciones eólicas se mantendrán su tendencia de aumento durante los próximos años con un aumento medio anual de 50GW de capacidad instalada, pudiendo alcanzar en 2023 los 65 GW medios de aumento en los escenarios más optimistas. [1]

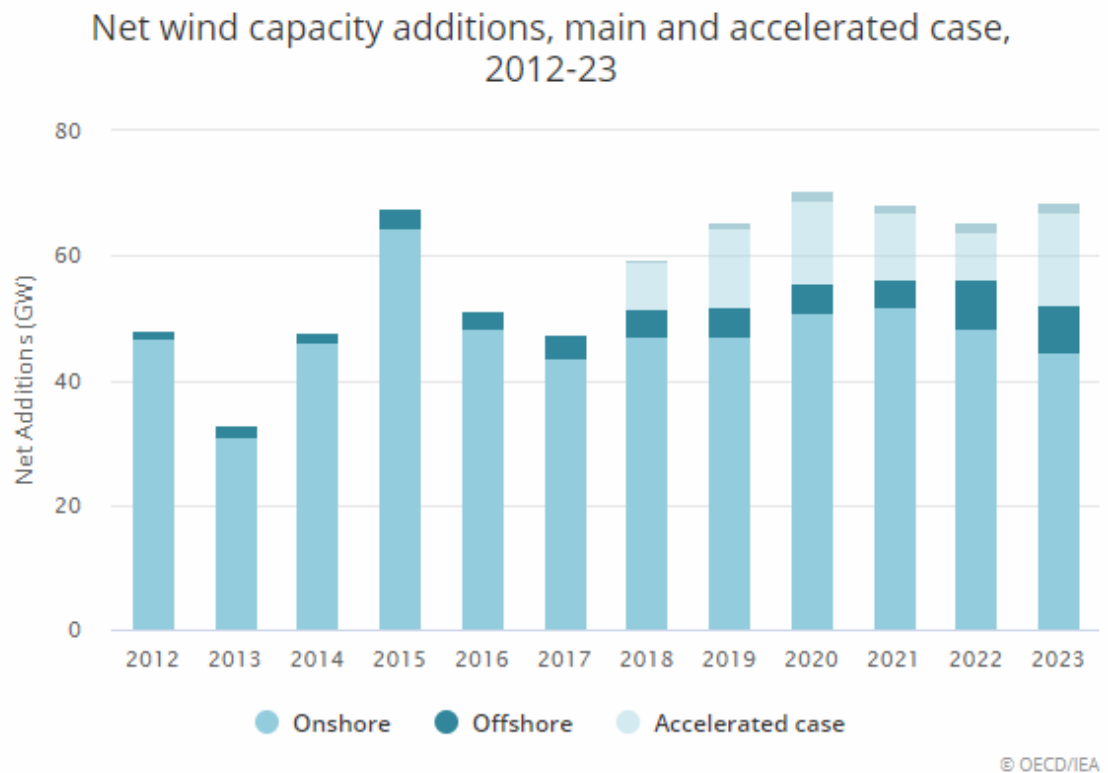


Fig. 1. 3 Incremento del parque eólico mundial 2012-2023 [2]

## 1.2) Situación energética actual a nivel europeo

El Consejo Europeo en 2014 estableció un marco de actuación hasta el 2030 de la Unión Europea (UE) en relación a la energía y el clima. Dicho marco, partiendo de los objetivos de la UE en relación a las energías renovables, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), eficiencia energética y las interconexiones, fija las principales orientaciones estratégicas, así como los elementos de actuación fundamentales.

Respecto a la disminución de las emisiones de GEI, se estableció para 2030 una reducción de al menos un 40% respecto a las emisiones de 1990. En lo referido a la cuota de energías renovables, esta debe ser en 2030 como mínimo del 27% dentro del consumo total de la energía de la UE. En cuanto a la eficiencia energética, la UE fijó un objetivo de al menos 27% de ahorro en 2030 respecto al 1990, con posibilidad de revisión antes de 2020, teniendo en mente un nivel de 30%. Finalmente, respecto a las interconexiones eléctricas, el objetivo a alcanzar es del 15%.

A continuación, se muestran en la siguiente tabla los resultados obtenidos a partir de simulaciones para un caso base para 2030. Debido a que el proyecto se centra en el desarrollo y avance de la energía eólica, si se hace un análisis detallado de dicha energía en concreto, cabe destacar que la generación para esa fecha se estima entorno a los 69,5 TWh, con un coste medio de energía final de 165,4 €/MWh.[3]

*TABLA 1. 1 FUENTE DE ENERGÍA Y COSTE MEDIO*

ESCENARIO BASE (DG 2030)			
ENERGÍA PRIMARIA (TWH)		VALORES ANUALES (O ANUALIZADOS)	
Nuclear	151,1	Coste total de la energía (1.000 M€)	154,9
Carbón	19,8	Coste de operación (1.000 M€)	68,6
Hidráulica fluyente	6,3	Coste de inversión (1.000 M€)	86,4
Hidráulica regulable	25,7	Coste medio energía primaria (€/MWh)	135,2
Eólica	69,5	Coste medio energía final (€/MWh)	165,4
Solar fotovoltaica	88,4	Coste medio gen. electricidad (€/MWh)	51,0
Solar termoeléctrica	24,4	Coste de CO <sub>2</sub> (1.000 M€)	5,9
Solar térmica	6,3	Coste de NO <sub>x</sub> (1.000 M€)	3,7
Biomasa (cultivos)	19,9	Coste de SO <sub>2</sub> (1.000 M€)	1,4
Biomasa (agricultura)	18,6	Coste de PM 2,5 (1.000 M€)	2,8
Biomasa (bosques)	11,8	CO <sub>2</sub> difusos (MtCO <sub>2</sub> )	94,3
Electricidad exportada	-22,4	CO <sub>2</sub> ETS (MtCO <sub>2</sub> )	69,7
Gasolina	97,9	Emisiones CO <sub>2</sub> (MtCO <sub>2</sub> )	164,0
Diésel	90,9	% Renovables eléctricas	60,9
Queroseno	12,0	Generación eléctrica en b.c.(TWh)	320
Otros derivados petróleo	0,0	% Electrificación demanda final	29,0
Biodiesel	17,4	% Demanda final renovable	25,4
Gas Natural	466,1	% Mejora de eficiencia (objetivo europeo)	39,4
GLP	42,4	% Mejora de eficiencia (respecto a 2015)	20,7

El pasado 28 de noviembre de 2018 la Comisión Europea presentó una propuesta de documento de visión de largo plazo para una economía avanzada, moderna, competitiva y con emisiones netas nulas para 2050. Esta servirá de base para la presentación formal por parte de la UE de una estrategia de reducción de emisiones a largo plazo en 2020 en el marco del Acuerdo de París.

La consecución de estos objetivos requiere una transformación total del conjunto de la economía y en particular pasa por un cambio a un modelo energético descarbonizado basado en el ahorro y la eficiencia energética y en las energías renovables, eliminando prácticamente el consumo de combustibles fósiles, primero carbón y petróleo y, posteriormente, gas natural.

Como resultado de la revolución tecnológica experimentada por las energías limpias (renovables, baterías...), es económicamente viable con la tecnología actual una reducción del 80% de las emisiones en 2050. Ello requeriría un mayor esfuerzo en eficiencia energética, la transición a una economía circular o el despliegue completo de alguna de las tecnologías que actualmente han alcanzado un alto nivel de madurez (por ejemplo, tecnologías renovables como la eólica o la solar fotovoltaica). [4]

Sin embargo, pasar del 80% a la neutralidad de CO<sub>2</sub> a 2050 requerirá contar con tecnologías que están aún por desarrollar (CCUS<sup>1</sup>, producción de H<sub>2</sub> por electrólisis, metanización del H<sub>2</sub>, etc.), que actualmente tienen costes muy elevados y bajas eficiencias.

La descarbonización del sector energético pasa por un proceso de electrificación de los usos finales de la energía (transporte, usos térmicos en edificación, industria...), llegando a alcanzar una generación de electricidad con un 100% de energías renovables en 2050. La sustitución de otras energías contaminantes permitirá, además, aumentar de forma muy significativa la eficiencia de todo el sistema, debido a la mayor eficiencia energética de los usos eléctricos.

El objetivo de emisiones netas nulas es altamente deseable desde un punto de vista económico y ambiental: [4]

- Impactos del cambio climático: el riesgo relacionado con el clima es mayor a niveles más altos de calentamiento global, y algunos impactos, como la pérdida de ecosistemas, pueden ser duraderos o irreversibles.
- Impacto positivo en el PIB: el objetivo de 2°C conllevaría que el PIB real fuese en torno a un 1,6% más alto que en el escenario base en 2050. Para el objetivo del 1,5°C (alineado con la visión presentada por la Comisión Europea) se lograría un superávit sobre el escenario base de hasta un 2,2% del PIB real en 2050.
- Calidad del aire: las muertes prematuras por exposición a contaminación del aire disminuirían en un 40%; medida en términos monetarios, supondría unos beneficios de entre 140.000 y 340.000 de M€ en 2050, en comparación al año 2015.
- Productividad en el trabajo al aire libre: se podría evitar una pérdida del 10 al 15% de la productividad laboral de los trabajos que se realizan al aire libre, principalmente en los países del sur de Europa.
- Reducción de la dependencia energética del exterior: entre los años 2021-2050 se produciría un ahorro en la factura de importación de combustibles que podría ir desde los 1.400 millones de euros hasta los 3.000 millones de euros al año.
- Reducción de la vulnerabilidad de los hogares: los hogares gastarían, en promedio para todos los escenarios de descarbonización analizados, un 5,6% de sus ingresos en energía, es decir, casi 2 puntos porcentuales menos que en 2015.
- Desarrollo industrial para las empresas europeas

---

<sup>1</sup> Captura, secuestro y utilización de CO<sub>2</sub>, por sus siglas en inglés.

- Promoción del empleo: el escenario de las emisiones netas nulas generaría en torno a 1 millón de empleos adicionales en 2050.

Históricamente, el sector energético eólico ha sido uno de los pioneros en tecnología, investigación e innovación en Europa. Esto ha llevado a la energía eólica a ser competitiva con la generación fósil, de hecho, las instalaciones eólicas onshore es actualmente la fuente de generación más barata en el caso de tener que realizar una nueva instalación. Tanto la energía eólica como la solar han dejado de ser meramente un nicho en el mercado, aunque todavía necesitan apoyo y una perspectiva de mercado estable para madurar plenamente. Al mismo tiempo, el sector energético se está adentrando en un proceso de grandes cambios.

Con el objetivo de reducir los efectos adversos del carbono y otras emisiones en el clima, todo el sistema energético ha de descarbonizarse rápido. Para ello, las energías renovables tienen que crecer exponencialmente. La electrificación de industrias intensivas y el sector transporte será fundamental. Los sistemas de calefacción y de acondicionamiento en general también han de ser electrificados dado que se darán más condiciones meteorológicas extremas provocadas por el cambio climático, lo que provocará que aumente la demanda significativamente. [5]

El cambio climático también hará cambiar la forma en la que pensamos acerca del consumo energético, distribución y generación. China ya está experimentando con la integración de renovables en una nueva red transformada debido a los graves desafíos medioambientales a los que se enfrenta, y lo hace a una velocidad difícil de alcanzar en Europa. Su objetivo es desarrollar sistemas de suministro de energía más receptivos, flexibles, adaptables e inteligentes. La rapidez con que los gobiernos asiáticos están trabajando plantea un desafío directo al liderazgo mundial de la UE en materia de energías renovables. Las políticas de la UE deben mantener a Europa por delante de la curva de la tecnología de la energía sostenible.

Con los sectores industriales tradicionales en declive, Europa tiene que doblar sus esfuerzos de apoyo hacia las industrias limpias y renovables que desarrollan soluciones innovadoras que garantizan una sociedad próspera y sostenible. Todavía muchos de los planes nacionales no son lo suficientemente restrictivos para conseguir una transición rápida hacia una sociedad limpia, sostenible y electrificada y poder cumplir así con los objetivos del Acuerdo de París. [5]

La investigación e innovación se convierten en un pilar fundamental para hacer posible la integración de renovables en la red, incrementar su fiabilidad y producción, y reducir los costes.

La UE se ha comprometido a convertirse en el líder mundial en tecnología de energía renovable y a alejarse de un sistema energético basado en combustibles fósiles. La Hoja de Ruta Energética de la UE 2050 (EU Energy Roadmap 2050) pretende garantizar un suministro energético limpio, competitivo y fiable para todos los ciudadanos y empresas europeos. La Hoja de Ruta subrayó que la descarbonización de la economía de la UE entre el 80 y el 95 % requiere una descarbonización completa del sistema eléctrico. Se necesita una fuerte aceleración de la electrificación de los procesos de calefacción y refrigeración, transporte y procesos industriales que deben ser impulsados por energías renovables.

Esta transición energética representa una oportunidad extraordinaria para Europa, que está bien situada para convertirse en el centro mundial de inversión en energías limpias.

En 2017, la inversión mundial en energía no contaminante ascendió a 333.500 millones de dólares. Liderar el camino en la investigación y la innovación de la energía eólica y en la integración de sistemas de energías renovables permitirá a Europa maximizar los beneficios económicos de la transición energética global desbloqueando la inversión en tecnología de punta y aprovechar el ingenio y el conocimiento de Europa. Esto es especialmente cierto en el sector de la energía eólica, donde Europa ya ha establecido una ventaja estratégica.

La energía eólica tiene el potencial de estar en el centro del nuevo sistema energético europeo. La capacidad de energía eólica en la UE podría duplicarse de 160 GW a 323 GW para 2030, alcanzando cerca del 30% de la demanda de energía de la UE. Aparte de los beneficios sociales y de proporcionar a los consumidores energía segura, limpia y libre de emisiones a costes asequibles, este crecimiento también podría liberar unos 569 mil puestos de trabajo en Europa y contribuir con 90.000 millones de euros al PIB de la UE. Para desarrollar este potencial, la UE tendrá que reforzar su compromiso con la energía eólica. [5]

La energía eólica ha logrado reducciones drásticas de costes gracias a importantes inversiones públicas y privadas en I+D. En tan solo cuatro años los precios para las subastas eólicas onshore han caído de más de 100 €/MWh en 2013 a alrededor e incluso por debajo de 40 €/MWh en 2017. Y los costes en el viento offshore también están cayendo rápidamente. En 2014, las ofertas llegaron a más de 150 €/MWh, mientras que en 2017 los precios bajaron a 65 €/MWh e incluso más bajos.

La transición energética retará a la UE a liderar el desarrollo de soluciones para un diseño mejorado del mercado. Esto incluye la prestación de servicios auxiliares mediante energías renovables variables y requerirá abordar los problemas relacionados con el almacenamiento estacional. Siendo necesario para garantizar que Europa aproveche plenamente el potencial de las soluciones energéticas renovables variables al abordar las diversas necesidades del sistema energético.

La UE es capaz de competir en industrias maduras como la aviación y el automóvil debido a sus esfuerzos sostenidos para apoyar la investigación y la innovación. Si la UE quiere cumplir su compromiso de ser un líder mundial en energías renovables, la misma lógica debería aplicarse a la tecnología eólica. Europa debe apoyar este sector estratégico sosteniendo la tendencia actual a la reducción de costes, tanto en el viento terrestre como en el mar, y al mismo tiempo intensificar la transición hacia un sistema energético flexible con energías renovables variables en su núcleo. La ejecución de este proyecto planteará enormes retos de investigación e innovación.

El sector de la energía eólica europea invierte más de mil millones de euros, casi el 5 % de su contribución directa al PIB, anualmente en el desarrollo de nuevas tecnologías innovadoras para reducir aún más los costes y facilitar la integración de la energía eólica en el sistema energético. La industria está invirtiendo mucho en digitalización, las tecnologías digitales son un facilitador clave y serán vitales para garantizar el liderazgo mundial del sector eólico europeo. Sin embargo, el apoyo público es fundamental para mantener el liderazgo mundial en la transición energética más amplia y para mantener a las empresas de la UE competitivas en el mercado mundial. La cuota de la UE en la capacidad instalada global ha estado cayendo desde 2011 y cualquier disminución posterior pone en riesgo los puestos de trabajo existentes (262 mil en 2016) y la balanza comercial positiva que la energía eólica crea para la UE (2,4 mil millones de euros en 2016). Una industria eólica de la UE más fuerte podría duplicar su nivel de empleo y contribuir al crecimiento del PIB. [5]



El apoyo de la UE en forma de subvenciones para proyectos y otros instrumentos financieros, como el capital y la financiación de entresuelo, seguirá siendo fundamental para mantener la tendencia de reducción de costes en toda la industria. Lograr la competitividad con la energía convencional todavía requiere grandes avances tecnológicos. Los programas de la UE como Horizonte 2020, InnovFin y NER300 han ayudado enormemente al sector a avanzar.

Por ejemplo, se requerirá un gran salto en tecnología de aerogeneradores con el desarrollo de turbinas eólicas de mayor tamaño (13-15 MW), junto con nuevos avances tecnológicos y técnicas innovadoras en toda la cadena de suministro para fabricarlas, instalarlas, explotarlas, mantenerlas y desmantelarlas. Se necesita un apoyo específico a nivel nacional y europeo para garantizar la disponibilidad de la infraestructura adecuada y el desarrollo de una cadena de suministro estable que permita al sector de la energía eólica dar este próximo paso crucial.

En toda Europa, los presupuestos nacionales están sometidos a una fuerte presión. El gasto público en investigación e innovación está disminuyendo o estabilizándose, ya que los gobiernos tienen que responder por cada euro gastado. En un entorno tan escaso de recursos, es fundamental que el apoyo público a la investigación y la innovación se centre en las tecnologías que tendrán un impacto positivo duradero en la sociedad. Para el sector de la energía, esto significa invertir en las tecnologías que impulsan una transición energética más amplia y que producen resultados tangibles a corto, medio y largo plazo. La industria de la energía eólica se ha consolidado firmemente como un sector estratégico para la UE y es una apuesta segura para grandes inversiones. El sector ha superado continuamente las expectativas iniciales y desempeñará un papel destacado en el sistema energético europeo del futuro. [5]

De acuerdo con Eurostat, oficina de estadística de la Unión Europea, en 2016 se produjeron 210,7 millones de tep (toneladas equivalentes de petróleo) con energías renovables, esto equivale a 2,45 millones de GWh. Distribuidos de la siguiente forma:

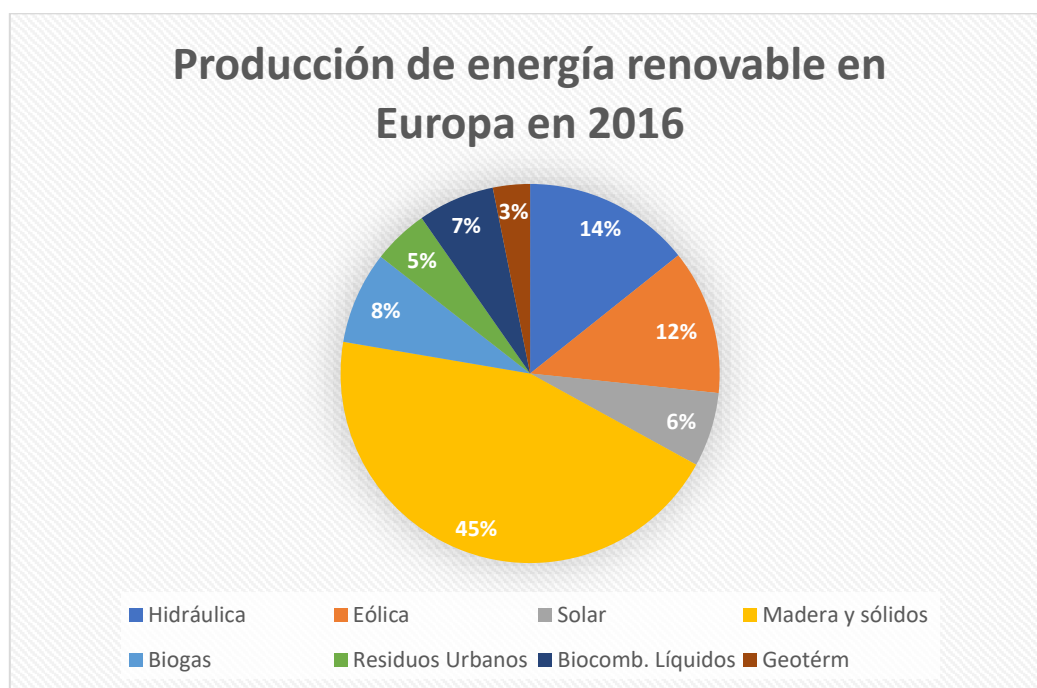


Fig. 1. 4 Producción de energía renovable en Europa 2016

### 1.3) Situación energética actual en España

La gran mayoría de la energía fotovoltaica y eólica que se incorpora actualmente al sistema eléctrico español se debe a las adjudicaciones realizadas en las subastas de energías renovables que tuvieron lugar en 2016 y 2017, a través del régimen retributivo implantado en el Real Decreto 413/2014. Dicha incorporación prevé un incremento de 8.737 MW, y haciendo un desglose de dicha energía, serán 4.608 MW de energía eólica, 3.910 MW de energía fotovoltaica y 219 MW de biomasa y residuos.

El Consejo de Ministros del Gobierno de España creó en 2017 una Comisión de Expertos, cuyo objetivo es elaborar un Informe a través del cual se analicen las posibles opciones para definir una estrategia que permita que España cumpla los objetivos ambientales de la UE, maximizando el bienestar de sus ciudadanos.

Dicha estrategia precisa de un análisis detallado previo debido a diversas causas. Una de ellas se debe a la incertidumbre asociada a los cambios tecnológicos, los cuales no tienen una tendencia lineal, si no que avanzan de manera exponencial, sin limitarse tan solo a las nuevas tecnologías empleadas para producir electricidad, ya que también incluyen los nuevos modelos de negocio, las innovaciones en las infraestructuras, los nuevos servicios, etc. [3]

Un aspecto de dificultad es la determinación de la función que van a desempeñar ciertas tecnologías durante esa transición energética. Por ejemplo, en el sector del transporte de mercancías, hay dudas sobre qué será más eficiente, si electrificar el ferrocarril, lo cual es muy costoso, o el empleo de gas natural o baterías, para impulsar dichos vehículos.

A pesar de las dudas comentadas existentes en este contexto, todo concluye en la clave para el proceso de descarbonización será el uso de fuentes de energía renovables para la producción de energía eléctrica.

Dichas instalaciones de producción de electricidad mediante fuentes de energía renovables han sido capaces de alcanzar la paridad en numerosos casos, verificando su capacidad de reducir costes llegando a ser rentables a los precios actuales de mercado.

Cabe destacar que, dentro de una misma fuente de energía primaria, habrá que realizar un análisis de la eficiencia de las diversas soluciones que esta ofrece. Por ejemplo, dentro de la energía solar se encuentra la generación renovable distribuida, que consiste en los paneles solares instalados en los tejados, los cuales proporcionan un ahorro de energía debido a las reducidas pérdidas, proporcionando a su vez una participación más activa del consumidor en el ámbito del sistema eléctrico. Por otro lado, se encuentra la generación renovable centralizada, por ejemplo, las grandes granjas solares, las cuales proporcionan una gran eficiencia que resulta de las economías de escala y de la optimización del emplazamiento, permitiendo grandes reducciones de los costes de energía eléctrica generada y entregada al sistema eléctrico.

La transición energética involucra tanto a empresas como a consumidores, productores, administraciones, etc. La gran mayoría de las actividades que se ven afectadas están liberalizadas de manera que, los consumidores y las empresas serán los que realmente tomen las decisiones, materializando la descarbonización de la economía. [3]

En febrero de 2019 el gobierno español presentó su Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC) con el objetivo de mostrar la senda de reducción de emisiones y así alcanzar

los objetivos acordados por la Comisión Europea, incluso llegando a una producción 100% renovable y una reducción del 90% de gases de efecto invernadero (GEI) en 2050.

Según el PNIEC, tomando las medidas indicadas en 2030 se podrá alcanzar: [6]

- 21% de reducción de GEI respecto a 1990 (el objetivo es 20%)
- 42% de renovables sobre el uso final de la energía
- 39,6% de mejora de la eficiencia energética (el objetivo es de al menos 32,5%)
- 74% de energía renovable en la generación eléctrica

La senda se basa en los principios de neutralidad tecnológica y coste eficiente. Y dado que 3 de cada 4 toneladas de GEI se originan en el sector energético, este es el sector clave para la descarbonización.

En el sector eléctrico, a 2030 el precio del CO<sub>2</sub> rondará los 35 €/tCO<sub>2</sub>eq lo que provoca que las centrales de carbón cesen su producción. De esta manera quedarán 157 GW de potencia eléctrica instalada, 50 eólica, 37 PV, 27 CCGT, 16 hidroeléctrica, 8 bombeo, 7 termo-solar y 3 nuclear, a lo que hay que añadir 6 GW de almacenamiento adicionales.

También de acuerdo con el PNIEC, se alcanza el 42% de renovables en la energía final. En gran parte gracias a alcanzar un objetivo de eficiencia, es decir, una reducción de consumo de energía primaria respecto al tendencial del modelo PRIMES de 2007 del 39,6% superando el objetivo del 32,5% establecido por el conjunto de la UE.

Respecto a la seguridad energética, se reduce la dependencia (del 74% al 59%) al reducirse la importación de combustibles fósiles, se diversifican las fuentes de energía y suministro, y aumenta la flexibilidad del sistema energético nacional. Las líneas de trabajo son aumentar interconexiones eléctricas, optimizar la capacidad existente, profundizar en preparación de anticontingencias, desarrollar la estrategia de Seguridad Nacional, adaptarse al reglamento europeo de preparación ante riesgos en el sector de la electricidad y mejorar los planes preventivos y de emergencias en el ámbito de suministro. [6]

Para el mercado interior de la energía es necesario integrar la creciente generación renovable, lo que hace necesario reforzar las líneas de transporte y distribución, las conexiones peninsulares, los sistemas no peninsulares e interconexiones entre sistemas insulares. También se desarrollarán mecanismos de gestión y almacenamiento de renovables eléctricas no gestionables. Actualmente el grado de interconexión eléctrica ibérico con el resto de Europa es menor al 5% por lo que será necesario seguir desarrollando nuevas interconexiones.

Las actividades I+I+C (Investigación, Innovación y Competitividad) orientadas a la transición energética se articulan en las siguientes líneas de trabajo: eficiencia energética, tecnologías renovables, flexibilidad y optimización del sistema energético, vehículo eléctrico, baterías y puntos de recarga y CCS. [6]

Según los datos de MINETAD (Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital) e IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) la producción eléctrica renovable se ha estabilizado desde 2010 llegando a los 104.607 GWh producidos en 2016, de los cuales casi 49 mil GWh proceden del recurso eólico.

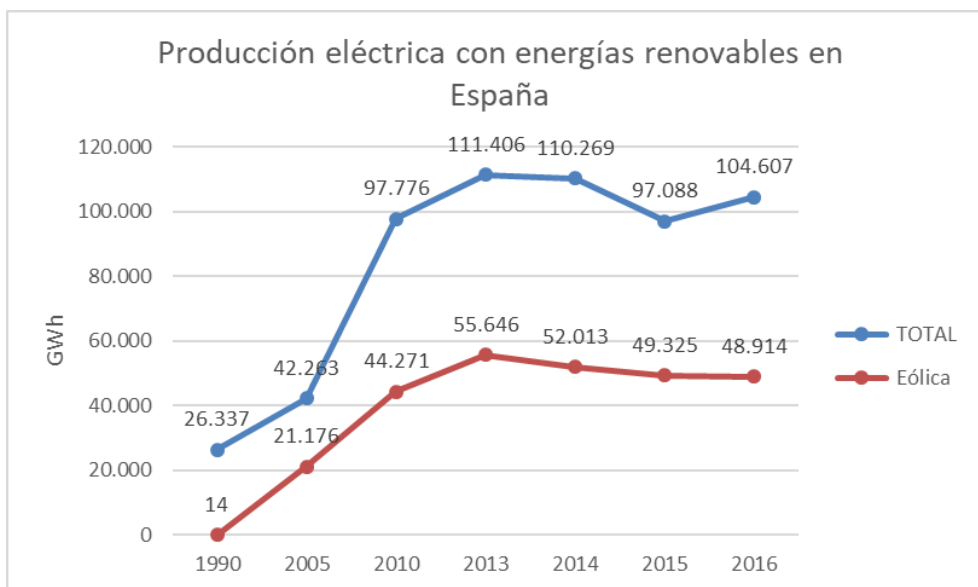


Fig. 1. 5 Producción eléctrica con energías renovables en España

### 1.3.1) Mini/micro eólica en España

Las turbinas eólicas de baja potencia son un gran método para suministrar energía renovable a hogares, redes e infraestructuras urbanas, o sistemas off-grid cuando se requiere. Cuando se establecen en condiciones favorables, pueden proporcionar energía limpia de la manera más satisfactoria a pesar de que no son tan poderosos como otros métodos de generación de energía.

En España, los aerogeneradores de pequeño tamaño han sido utilizados principalmente para el autoconsumo de instalaciones aisladas y, generalmente, conectadas a baterías. Algunos ejemplos de este sistema son los sistemas de vigilancia de carreteras, repetidores de telefonía o radio, e incluso el suministro de viviendas alejadas de la red eléctrica.

A continuación, se presentan las principales características de la minieólica: [7]

- Generación cercana a los puntos de consumo dada su fácil instalación y relativamente pequeño tamaño, así como suministro a zonas aisladas
- Versatilidad de integración en sistemas híbridos aprovechando así la instalación de otro tipo de instalaciones como, por ejemplo, paneles fotovoltaicos
- Baja inversión dada la facilidad de instalación
- Bajo coste de mantenimiento debido a la menor cantidad de partes mecánicas móviles y la menor tensión soportada
- Funcionamiento con vientos moderados, lo que permite reducir la velocidad de cut-in
- Adaptación a emplazamientos reducidos
- Reducido impacto ambiental (y visual)

Estas características hacen notable sus posibles beneficios de cara a la generación distribuida, con posibles aplicaciones a nivel industrial y doméstico, siendo de gran interés su integración en la edificación. El desarrollo de esta tecnología, junto con el aumento del precio de los combustibles fósiles, el calentamiento global, y el continuo aumento de la demanda de electricidad, pueden traducirse en la penetración de sistemas minieólicos a nivel nacional.

## **1.4) Marco regulador**

La tecnología desarrollada por Vortex Bladeless abre la puerta del autoconsumo en zonas urbanas a la energía eólica. De esta forma, es relevante analizar el marco regulador bajo el que se rige el autoconsumo en España para analizar la posible entrada al mercado de estos aerogeneradores. Este marco regulador se centra en el modelo ya desarrollado de la empresa, es decir, el aerogenerador de 2,75 metros de altura. Además, podría englobarse dentro de los generadores de hasta 100 kW de potencia, viéndose sensiblemente afectado por los cambios legislativos que se muestran más adelante.

El pasado 7 de octubre de 2018 entraron en vigor una serie de medidas relacionadas con el autoconsumo a través del “Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores”.

En este documento se tratan regulaciones que afectan especialmente a los pequeños autoconsumidores (potencia instalada no superior a 100 kW). Se prevé que estas medidas de fomento del autoconsumo ayuden a los consumidores a gestionar sus necesidades energéticas de una forma más eficiente. Son definidas dos modalidades: con y sin excedentes. Las primeras quedan exentas de la obligación de inscripción en el registro administrativo de instalaciones de producción de energía eléctrica y las segundas quedan sometidos exclusivamente a los reglamentos técnicos correspondientes. Si la energía autoconsumida es de origen renovable queda exenta de todos los cargos y peajes.[8]

Posteriormente al RD (Real Decreto) 15/2018, ha sido publicado el Real Decreto 244/2019, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. Su objetivo es regular aspectos que habían quedado abiertos tras la publicación del RD 15/2018, relacionados con configuraciones de medida, condiciones administrativas y técnicas para conexión a red, los mecanismos de compensación de excedentes para las instalaciones de autoconsumo que se les permita, así como la organización de un registro de autoconsumo administrativo sencillo. [9]

### **1.4.1) Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores**

De acuerdo con el Real Decreto-ley: “La apuesta por una transición energética es indispensable y urgente. El autoconsumo eléctrico renovable es imprescindible para lograr que el consumidor pueda obtener una energía más limpia y barata. En España, la actividad de autoconsumo apenas ha iniciado su despliegue debido a una serie de barreras regulatorias existentes, que dificultan, desincentivan o hacen inviable económicamente esta actividad. Lo anterior impide que los consumidores-productores, y la sociedad en su conjunto, puedan beneficiarse de las ventajas que puede acarrear esta actividad, en términos de menores necesidades de red, mayor independencia energética y menores emisiones de gases de efecto invernadero. La implantación del autoconsumo renovable permitirá disminuir la factura energética con carácter inmediato a los consumidores que lo instalen y, adicionalmente, detraerá demanda de energía en el mercado mayorista, contribuyendo de esta manera a una contención y disminución

de precios en el mercado mayorista de energía eléctrica, a una mejora de las condiciones ambientales y a una reducción de la importación de hidrocarburos que redundará en una mejora de la balanza de pagos. “ [8]

Introduce tres principios fundamentales en lo que al autoconsumo se refiere: [8]

- Se reconoce el derecho a autoconsumir energía eléctrica sin cargos
- Se reconoce el derecho al autoconsumo compartido por parte de uno o varios consumidores para aprovechar las economías de escala
- Se introduce el principio de simplificación administrativa y técnica, especialmente para las instalaciones de pequeña potencia

Además, habilita a las Comunidades Autónomas a crear y gestionar los correspondientes registros territoriales de autoconsumo.

Bajo el título “Autoconsumo de electricidad” se trata el artículo 18, el cual modifica la ley 24/2013. A continuación, se muestran los cambios considerados de mayor relevancia:

- Se modifica el artículo 9, el cual queda redactado como sigue: [8]

«Artículo 9. Autoconsumo de energía eléctrica.

1. “A los efectos de esta Ley, se entenderá por autoconsumo el consumo por parte de uno o varios consumidores de energía eléctrica proveniente de instalaciones de producción próximas a las de consumo y asociadas a los mismos. Se distinguen las siguientes modalidades de autoconsumo:
  - a) Modalidades de suministro con autoconsumo sin excedentes. Cuando los dispositivos físicos instalados impidan la inyección alguna de energía excedentaria a la red de transporte o distribución. En este caso existirá un único tipo de sujeto de los previstos en el artículo 6, que será el sujeto consumidor.
  - b) Modalidades de suministro con autoconsumo con excedentes. Cuando las instalaciones de generación puedan, además de suministrar energía para autoconsumo, inyectar energía excedentaria en las redes de transporte y distribución. En estos casos existirán dos tipos de sujetos de los previstos en el artículo 6, el sujeto consumidor y el productor.” [8]
2. “Reglamentariamente se desarrollará el concepto de instalaciones próximas a efectos de autoconsumo. En todo caso se entenderán como tales las que estén conectadas en la red interior de los consumidores asociados, estén unidas a estos a través de líneas directas o estén conectadas a la red de baja tensión derivada del mismo centro de transformación.” [8]
3. “Las instalaciones de producción no superiores a 100 kW de potencia asociadas a modalidades de suministro con autoconsumo con excedentes estarán exentas de la obligación de inscripción en el registro administrativo de instalaciones de producción de energía eléctrica. No obstante, las Comunidades Autónomas y las Ciudades Autónomas de Ceuta y Melilla podrán dar de alta, de oficio, dichas instalaciones en sus respectivos registros administrativos de autoconsumo. Reglamentariamente se establecerá por el Gobierno el procedimiento para la remisión de dicha información al Ministerio para la Transición Ecológica para su incorporación en el registro administrativo de instalaciones de producción de energía eléctrica.” [8]

4. “Para el seguimiento de la actividad de autoconsumo de energía eléctrica, desde el punto de vista económico, y de su incidencia en el cumplimiento de los objetivos de energías renovables y en la operación del sistema, se crea en el Ministerio para la Transición Ecológica el registro administrativo de autoconsumo de energía eléctrica que será telemático, declarativo y de acceso gratuito. Las Comunidades Autónomas con competencias en la materia podrán crear y gestionar los correspondientes registros territoriales en los que deberán estar inscritas todos los consumidores acogidos a cualquiera de las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica ubicados en el ámbito territorial de aquéllas. Para aquellos sujetos consumidores conectados a baja tensión, en los que la instalación generadora sea de baja tensión y la potencia instalada de generación sea menor de 100 kW que realicen autoconsumo, la inscripción se llevará a cabo de oficio por las Comunidades Autónomas y Ciudades de Ceuta y Melilla en sus respectivos registros a partir de la información remitida a las mismas en virtud del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Reglamentariamente, previa audiencia de las Comunidades Autónomas y Ciudades de Ceuta y Melilla se establecerá por el Gobierno la organización, así como el procedimiento de inscripción y comunicación de datos al registro administrativo de autoconsumo de energía eléctrica. En dicho reglamento, se recogerá la información que las Comunidades Autónomas y Ciudades de Ceuta y Melilla deberán remitir al Ministerio para la Transición Ecológica para su incorporación en registro administrativo de autoconsumo de energía eléctrica estatal. Esta información deberá ser remitida aun cuando no dispusieran de registro administrativo autonómico.” [8]
5. “La energía autoconsumida de origen renovable, cogeneración o residuos estará exenta de todo tipo de cargos y peajes. En el caso en que se produzca transferencia de energía a través de la red de distribución en instalaciones próximas a efectos de autoconsumo se podrán establecer las cantidades que resulten de aplicación por el uso de dicha red de distribución. Los excedentes de las instalaciones de generación asociadas al autoconsumo estarán sometidos al mismo tratamiento que la energía producida por el resto de las instalaciones de producción, al igual que los déficits de energía que los autoconsumidores adquieran a través de la red de transporte o distribución estarán sometidos al mismo tratamiento que los del resto de consumidores. Sin perjuicio de lo anterior, reglamentariamente podrán desarrollarse mecanismos de compensación simplificada entre déficits de los autoconsumidores y excedentes de sus instalaciones de producción asociadas, que en todo caso estarán limitados a potencias de estas no superiores a 100 kW.” [8]
6. “Reglamentariamente se establecerán las condiciones administrativas y técnicas para la conexión a la red de las instalaciones de producción asociadas al autoconsumo. Estos requisitos serán proporcionales al tamaño de la instalación y a la modalidad de autoconsumo. Las instalaciones en modalidad de suministro con autoconsumo sin excedentes de hasta 100 kW se someterán exclusivamente a los reglamentos técnicos correspondientes. En particular, las instalaciones de suministro con autoconsumo conectadas en baja tensión se ejecutarán de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Las configuraciones de medida que sean de aplicación en las instalaciones de autoconsumo serán definidas reglamentariamente por el Gobierno. En todo caso, estas configuraciones

deberán contener los equipos de medida estrictamente necesarios para la correcta facturación de los precios, tarifas, cargos o peajes que le resulten de aplicación.»» [8]

- “Se modifica el apartado 43 del artículo 64, que queda redactado como sigue: «43. El incumplimiento de alguno de los requisitos técnicos de aplicación a las distintas modalidades de autoconsumo cuando se produjeran perturbaciones que afecten a la calidad de suministro en el ámbito de la red a la que están conectados.»» [8]
- “Se añade un apartado 14 al artículo 66, que queda redactado como sigue: «14. En relación con el autoconsumo, el incumplimiento de los requisitos y obligaciones establecidos, cuando no estuviera tipificado como muy grave; así como la aplicación incorrecta de las modalidades y de sus regímenes económicos asociados contemplados en esta Ley y su normativa de desarrollo.»» [8]
- “Se añade un nuevo párrafo al artículo 67.2, al cual se le añade el párrafo siguiente: «En los casos en los cuales la infracción esté relacionada con el autoconsumo, la sanción máxima será la mayor de entre las dos cuantías siguientes: el 10% de la facturación anual por consumo de energía eléctrica o el 10% de la facturación por la energía vertida a la red.»» [8]

Dentro del apartado “Movilidad Sostenible” se hace referencia al autoconsumo en la disposición adicional segunda. Basada en la aplicación del Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo: Estarán exentas de obtener permisos de acceso y conexión para generación las instalaciones de autoconsumo siguientes: [8]

- a) Las acogidas a la modalidad sin excedentes recogida en el artículo 9.1.a) de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.
- b) Aquellas con potencia de producción igual o inferior a 15 kW que se ubiquen en suelo urbanizado que cuente con las dotaciones y servicios requeridos por la legislación urbanística.

#### **1.4.2) Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.**

A través de este Real Decreto se eliminan todos los límites a la representación (a los operadores dominantes) para cualquier instalación con autoconsumo de origen renovable. La CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia) supervisará la existencia de competencia en el mercado tras esta eliminación.

Por otro lado, las medidas más relevantes que introduce son: [10]

- Se desarrolla la definición de instalaciones próximas a efectos de autoconsumo, como las conectadas a la red de baja tensión que deriva del mismo centro de transformación, o se ubiquen a menos de 500 metros o se encuentren en la misma referencia catastral (además de las conectadas a la red interior del consumidor).



- Se desarrolla el autoconsumo colectivo, donde el distribuidor asignará la energía generada a cada consumidor, de acuerdo a un porcentaje fijo que acuerden los participantes y comunicado previamente, hasta obtener unas medidas “individualizadas”. Se abre la puerta a que en el futuro puedan existir otros tipos de reparto (coeficientes dinámicos), sujeto a Orden Ministerial.
- Se habilita la retribución de excedentes:
  - Con carácter general, la energía excedentaria estará sometida al mismo tratamiento que la producida por el resto de las instalaciones de producción.
  - Además, se habilita la opción de compensación de excedentes en factura para instalaciones renovables < 100 kW, donde los excedentes se valorarán a precio horario por acuerdo entre las partes (en mercado libre) o según las fórmulas vigentes (en PVPC). El saldo mensual con el coste de energía consumida no podrá suponer un ingreso para el consumidor.
- Permite distintos titulares de las instalaciones de producción y de consumo.
- Queda pendiente el establecimiento de una cantidad por el uso de la red en caso de que se produzca transferencia de energía a través de la misma en instalaciones próximas, que deberá ser fijado por la CNMC.
- Se simplifican los trámites administrativos para las instalaciones de menor tamaño.
- Se da un mes al operador del sistema para remitir propuesta de adaptación de los POs (Procedimientos de Operación) e ITCs (Instrucciones Técnicas Complementarias). En paralelo, la CNMC tiene tres meses adaptar los formatos de comunicación entre agentes. Las empresas distribuidoras y comercializadoras tienen un mes adicional a los anteriores para adaptar sus sistemas (mínimo cuatro meses desde la entrada en vigor del RD).

Por último, el RD establece que las facturaciones que obtengan las empresas distribuidoras por energía reactiva serán ingresos liquidables, tema que había quedado pendiente de aclarar tras la publicación del RDL 15/2018. [10]

## **2) JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO**

Dada la situación energética actual se hace evidente la necesidad de inversión en energías renovables tanto por su positivo impacto medioambiental como por su precio cada vez más competitivo. La energía eólica y fotovoltaica lideran este conjunto de fuentes renovables, siendo las tecnologías de mayor desarrollo e implantación.

Sin embargo, hay zonas a las que se hace difícil la implantación de estas tecnologías ya sea por sus condiciones climáticas o por su aislamiento o dificultad de conexión a la red. En las zonas urbanas, por ejemplo, la energía solar es cada vez implantada con mayor frecuencia, pero la energía eólica tiene un acceso muy difícil a este sector del mercado dadas las grandes dimensiones de sus dispositivos o su escasa generación en el caso de los aerogeneradores de menor tamaño.

En este contexto surge una posible solución de la mano de la empresa Vortex Bladeless S.L., un nuevo tipo de aerogenerador sin partes mecánicas móviles que no solo permite aprovechar el recurso eólico en zonas urbanas, sino que parece ofrecer una esperanza de vida útil de alrededor de 20 años, con costes de mantenimiento inferiores a sus competidores directos.

Dado que su funcionamiento se basa en el fenómeno de desprendimiento de vórtices, puede funcionar en zonas urbanas donde la turbulencia es elevada debido a las numerosas edificaciones. Por este mismo motivo, los dispositivos se pueden situar con mayor proximidad relativa que los aerogeneradores convencionales, haciéndolos idóneos para zonas urbanas, de difícil acceso o espacios reducidos. Además, gracias a su sección circular, se adaptan rápidamente a los cambios de dirección del viento aumentando notablemente su tiempo de funcionamiento.

El objetivo de este trabajo es, por lo tanto, analizar el funcionamiento y rendimiento que podría tener la implantación de estos dispositivos en zonas urbanas, tanto trabajando de forma aislada como de forma conjunta con paneles fotovoltaicos.

Dado que estos dispositivos todavía están en fase experimental y con estudios de prototipos en funcionamiento, los datos utilizados proceden de diversas estimaciones realizadas tanto por la empresa Vortex Bladeless S.L. como por estudios independientes relacionados con la materia. Tras esto, será analizado el impacto económico y medioambiental de esta tecnología.

### 3) INTRODUCCIÓN TEÓRICA

#### 3.1) Tipos de aerogeneradores

Durante la última década, el uso de energías renovables, fundamentalmente solar y eólica, está creciendo a un ritmo muy rápido tanto en Europa como en el resto del mundo. Estas tecnologías lideran el sector de la transición energética hacia fuentes renovables y, además, son complementarias ya que pueden compensarse en periodos de escasez de cualquiera de ellas dando mayor estabilidad al suministro eléctrico. La reducción en el coste de paneles solares y turbinas eólicas ha llamado la atención de los inversores y demás clientes, interesados tanto en ahorrar dinero como en ayudar al medio ambiente a través de estos sistemas de generación.

En lo que respecta a la innovación en producción eólica a gran escala, destaca la tecnología offshore, pero uno de los problemas a los que se enfrenta es la corrosión de las partes mecánicas móviles. Con lo que la ausencia de rodamientos, engranajes... podría suponer una gran ventaja en este aspecto.

Algunos aspectos que considerar a la hora de desarrollar las turbinas son el coste, la eficiencia, el impacto que tienen sobre la naturaleza y la fauna, el impacto visual, las interferencias electromagnéticas de antenas y radares...

Las turbinas eólicas de baja potencia son una buena opción para proveer de energía renovable a las casas, distritos urbanos y distintas infraestructuras, incluso sistemas no conectados a la red eléctrica cuando éste es el caso. A pesar de que su potencia es menor a la de otras fuentes, pueden producir suficiente energía limpia para cubrir gran parte de las necesidades.

Actualmente existen dos familias principales en lo que respecta a dispositivos energéticos de producción eólica: HAWT (turbinas de eje horizontal) y VAWT (turbinas de eje vertical). Este proyecto se basa en la utilización de un tercer tipo recientemente añadido y patentado por la empresa "*Vortex Bladeless S.L.*" denominado turbinas Vortex (turbinas eólicas de oscilación). [11]

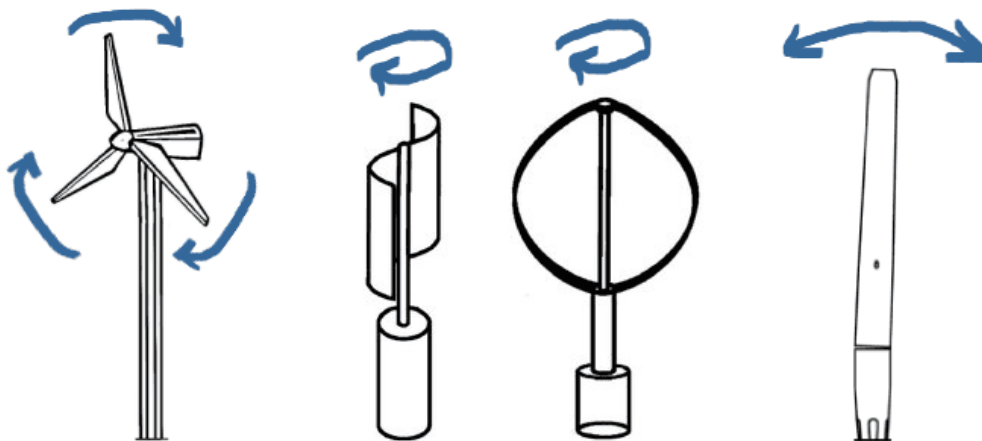


Fig. 3. 1 Diferentes tipos de aerogenerador

Las turbinas de eje horizontal son las más comunes debido a su madurez. Consta de aspas, eje de rotación y generador, y todos sus componentes se encuentran en lo alto de un poste, con las aspas orientadas hacia el viento. El eje es horizontal al suelo, tiene un engranaje en el extremo que hace girar el generador y, en algunos casos, también consta de frenos para llevar a cabo el frenado en el caso de vientos extremos.

En el caso de las turbinas de eje vertical, el eje y las aspas están conectados verticalmente a la estructura. Los componentes principales están más próximos al suelo dándole un centro de gravedad más estable.

Los generadores Vortex no se enmarcan en ninguna de estas dos familias ya que no hay ningún eje sobre el que se efectúe ninguna rotación. Estos aerogeneradores se basan en un fenómeno llamado vorticidad, “vortex shedding” (desprendimiento de vórtices), o “vortex street effect”. Éstas turbinas sin aspas (bladeless) funcionan convirtiendo la energía eólica del viento en electricidad a través de la oscilación que tiene lugar cuando la estructura del dispositivo alcanza la misma frecuencia de resonancia que los vórtices de viento producidos tras la perturbación que produce la turbina en el propio viento. Éste fenómeno es conocido en fluido dinámica como “Vortex Induced Vibrations” (VIV). Asimismo, hay que mencionar que los datos utilizados en este estudio acerca del dispositivo Vortex se basa en estimaciones del prototipo de acuerdo con las expectativas y objetivos de la empresa, ya que no es una tecnología completamente desarrollada.

Los distintos tipos de turbinas se comportan de forma diferente dependiendo de las características del viento. Una velocidad de inicio (punto de cut-in) media para las turbinas HAWT se encuentra entorno a 4m/s, mientras que para VAWT aumenta hasta 4,5 m/s. En el caso de las turbinas Vortex, el punto de cut-in se encuentra entre 3 y 3,5 m/s, debido a que ésta es la velocidad del viento a la que las turbinas se sincronizan con el desprendimiento de vórtices. [11]

La siguiente tabla muestra una aproximación de la posible potencia obtenida para diferentes velocidades de viento con turbinas promedio:

*TABLA 3.1 POTENCIA INSTALADA DE LOS AEROGENERADORES [11]*

<b>Velocidad del Viento (m/s)</b>	<b>Pequeño HAWT (W)</b>	<b>Pequeño VAWT (W)</b>	<b>Vortex Bladeless (W)</b>
<b>3,5</b>	0	0	3
<b>6</b>	72	44	35
<b>7</b>	104	66	60
<b>8</b>	135	86	80
<b>9</b>	160	105	93
<b>Velocidad Nominal</b>	400	200	100

Las turbinas de eje vertical y horizontal normalmente necesitan mayores velocidades de viento para empezar a producir energía, así como para alcanzar su potencia nominal. El diseño de las turbinas Vortex es fundamental para producir energía con velocidades de viento relativamente bajas, aunque esto también supone alcanzar la potencia máxima antes. Sin embargo, los aerogeneradores situados al nivel del suelo no suelen trabajar a su potencia nominal ya que la velocidad de viento que requieren no se da a esas alturas. Por otra parte, los aerogeneradores Vortex se detienen con velocidades en el rango de 12-13 m/s, en el cual el resto de las turbinas suelen seguir trabajando.

Las condiciones de cada zona son las que determinarán el mejor tipo de turbina para cada caso. En la mayor parte de áreas (con bajas velocidades de viento) no es adecuado utilizar aerogeneradores que solo te dan su máxima potencia un par de veces al mes. Sin embargo, un dispositivo que pueda trabajar de forma más continuada, incluso si su producción es menor, al final proporcionará una mayor cantidad de energía.

### 3.2) Aerogeneradores Vortex Bladeless

Tras la breve comparativa de los diferentes tipos de aerogeneradores existentes, se realiza la explicación concreta de la tecnología y funcionamiento de los aerogeneradores Vortex Bladeless. El funcionamiento de estos dispositivos es posible gracias a la resonancia o sintonía que tiene lugar cuando la oscilación de un cuerpo es producida o reforzada por un movimiento periódico externo. El aire puede inducir un movimiento oscilatorio en un cuerpo si su frecuencia natural y la frecuencia de las ondas del desprendimiento de vórtices son similares. Las vibraciones producidas en un cuerpo por vórtices son denominadas fenómeno VIV (Vortex Induced Vibration).

Cuando se ven sometidos a una corriente de cualquier fluido, por ejemplo, el aire, los objetos finitos generan flujos separados sobre gran parte de su superficie, es decir, las líneas de flujo no siguen el contorno del cuerpo, sino que se “rompen” y separan en cierto punto. Cuando se trata de bajos números de Reynolds, cuando esta separación se produce por primera vez, el flujo alrededor del cuerpo es regular. Sin embargo, en el caso de algunos números de Reynolds críticos, se forman dos capas finas de aire en el sotavento del objeto. Estas capas son inestables y generan grupos de vórtices conocidos como vórtices de Strouhal.



*Fig. 3. 2 Fenómeno de desprendimiento de vórtices [12]*

El desprendimiento de vórtices se produce de forma periódica, provocado por fuerzas perpendiculares a la dirección de incidencia del viento. Existe una constante de proporcionalidad “St” entre la velocidad media del viento “v”, la inversa de su longitud característica “ $\Phi$ ” y la frecuencia del desprendimiento de vórtices “f”:

$$f = \frac{St * v}{\Phi} \quad (1)$$

Dado que la dirección del viento es variable, la sección transversal de un dispositivo sin ejes mecánicos y que siempre esté orientada hacia el viento ha de ser circular. A esto hay que añadir que el gradiente de velocidades del viento aumenta conforme lo hace la distancia al suelo, es decir, la altura a la que se encuentre el dispositivo. Esta afirmación se demuestra a través de la ley exponencial de Hellmann:

$$v_h = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (2)$$

En la cual  $v_h$  es la velocidad a la altura  $h$ ,  $v_{ref}$  y  $h_{ref}$  son la velocidad y altura de referencia, respectivamente. El coeficiente de fricción  $\alpha$  es determinado experimentalmente y varía con la altura, hora, estación del año, naturaleza del terreno, velocidad del viento y temperatura.

La conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica ha de aproximarse lo máximo posible al límite de Betz. Según el cual no se puede extraer más del 59,3% de la energía cinética del viento para una sección constante dada ya que no se puede detener el flujo por completo, este solo puede verse reducido. Esto fue establecido por la teoría del disco actuador, basada en las leyes de conservación de flujo:

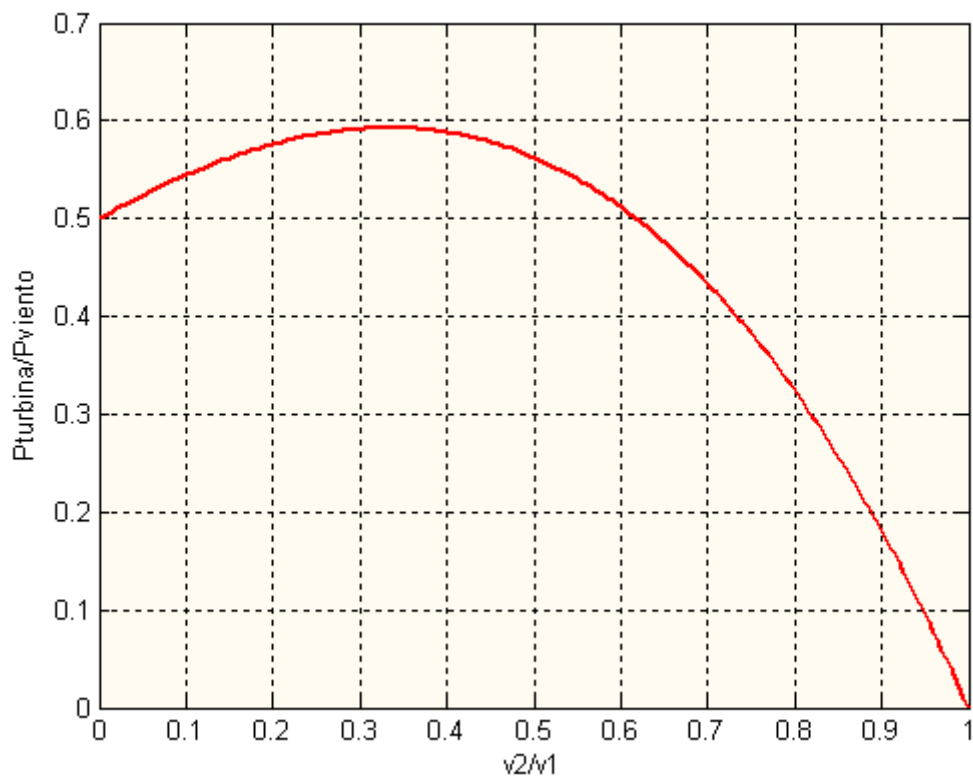


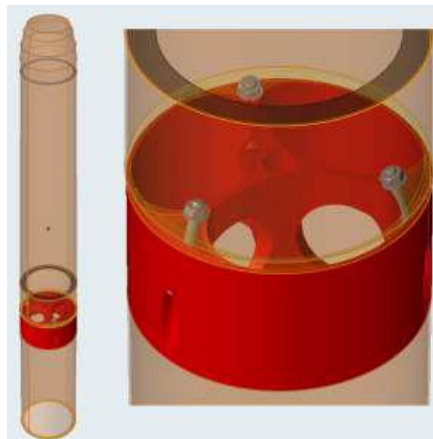
Fig. 3. 3 Representación gráfica del límite de Betz [13]

En este gráfico se puede apreciar la variación de la potencia extraída del viento en función del cociente de velocidades de salida y entrada del aire.

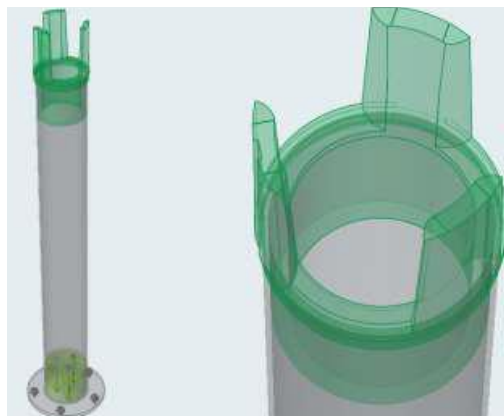
### 3.2.1) Dimensionado del dispositivo

En la estructura de los aerogeneradores Vortex Bladeless se pueden distinguir tres partes principales:

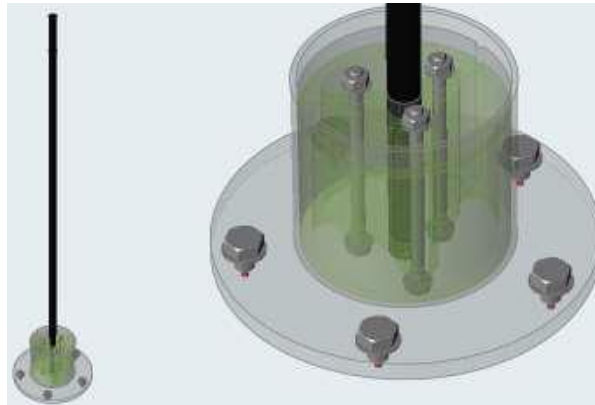
- **Mástil:** El objetivo estructural del mástil es absorber todas las fuerzas aerodinámicas y transmitirlas a dos componentes diferentes: el estátor y la varilla. La interacción con el estátor se basa en el efecto del sistema de sintonía, y con la varilla, se vincula físicamente por la unión atornillada.
- **Estátor:** El estátor absorbe las fuerzas resultantes en la interacción entre el mástil y el sistema de sintonía.
- **Varilla:** La varilla absorbe las fuerzas netas resultantes para producir el movimiento de oscilación del dispositivo. Este equilibrio entre las fuerzas resultantes del estátor y la varilla es crucial para reducir el daño de la fatiga en la varilla



*Fig. 3. 4 Mástil del dispositivo*

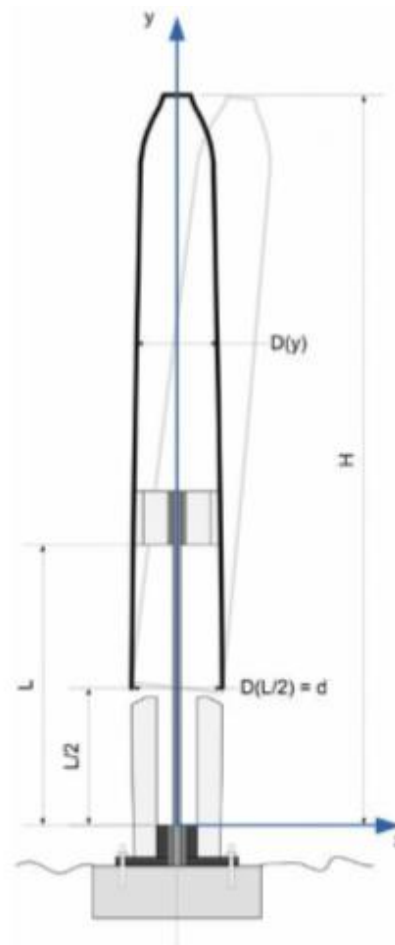


*Fig. 3. 5 Estátor del dispositivo*



*Fig. 3. 6 Varilla del dispositivo*

El mástil es la parte rígida de la estructura que interactúa directamente con el viento. Se puede alcanzar un desprendimiento de vórtices sincronizado a lo largo de todo el mástil modificando el diámetro en función de la altura. De esta forma, las fuerzas perpendiculares a la dirección del viento realizarán el trabajo en fase, alcanzando un rendimiento mayor que si no lo hicieran.



*Fig. 3. 7 Nomenclatura de las dimensiones [14]*



La longitud característica utilizada anteriormente no solo ha de tener en cuenta el diámetro de la estructura cilíndrica, ya que no se trata meramente de un objeto estático, sino que también tiene que considerar su oscilación:

$$\Phi = D + a * X \quad (3)$$

Donde la longitud característica es la suma del diámetro del mástil y de la amplitud de su oscilación 'X', multiplicada por un factor de ajuste 'a' el cual depende del número de Reynolds. Un correcto ajuste de este factor hace posible el desprendimiento de vórtices ordenado.

En cuanto al diseño del aparato, es considerada una barra flexible de longitud L que va desde la parte más alta del dispositivo hasta el suelo. Dado que el mástil es un cuerpo rígido con la capacidad de oscilar pequeños ángulos, la amplitud de oscilación puede ser considerada nula a la altura L/2. En esta posición la longitud característica coincide con el diámetro del mástil, por lo tanto:

$$\Phi = D * \left(\frac{L}{2}\right) \quad (4)$$

$$f = \frac{S_t * v_{\infty}(L/2)}{d} \quad (5)$$

En cualquier otra sección del mástil, donde no se pueda despreciar la oscilación, la frecuencia sería:

$$f = \frac{S_t * v_{\infty}(y)}{D(y) + a * X(y)} \quad (6)$$

Donde 'y' representa la altura en dicho punto. Por lo tanto, H es la distancia entre el anclaje de la base de la varilla flexible y la parte más alta del mástil. Si el desplazamiento en la parte alta del dispositivo es 'γ' veces el diámetro del mástil en su parte más baja:

$$H(y) = \frac{y - L/2}{H - L/2} * \gamma * d \quad (7)$$

Y dado que la frecuencia de desprendimiento de vórtices es la misma para todo el mástil:

$$D(y) = d * \frac{v_{\infty}(y)}{v_{\infty}\left(\frac{L}{2}\right)} - a * X(y) \quad (8)$$

Para poder calcular la frecuencia de desprendimiento de vórtices a lo largo de todo el mástil, habrá que estimar el gradiente de velocidades. Y para alcanzar la resonancia deseada, esta frecuencia debe coincidir con la oscilación normal de la estructura. [14]

### 3.2.2) Sistema de ajuste o sintonizado

Para aumentar las horas útiles de trabajo al año, hay que incrementar el rango de velocidades a las que el dispositivo trabaja. El rango de velocidades en los que se produce el efecto de resonancia en la estructura (rango de lock-in) es pequeño debido a que solo hay una frecuencia normal de oscilación para la estructura. Además, la frecuencia del desprendimiento de vórtices es proporcional a la velocidad del viento, la cual no es constante. [14]

El funcionamiento de un aerogenerador VIV sin el sistema de ajuste funcionaría de la siguiente forma: la masa del mástil es soportada por una varilla de cierta rigidez y el sistema es frenado por el alternador y el resto de las pérdidas de potencia. El sistema tendrá resonancia si la fuerza oscilatoria inducida por el viento es de la forma:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (9)$$

Donde 'm' es la masa que oscila bajo la acción de una fuerza conectada a un muelle de constante elástica 'k' y contante de amortiguación 'c'.

Para aumentar el rango de velocidades de trabajo se introduce un sistema magnético de sintonizado, ilustrado en el siguiente esquema:

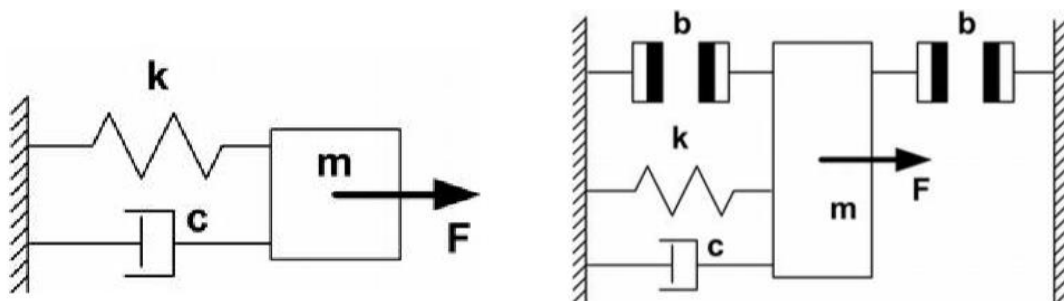


Fig. 3. 8 Sistema magnético de sintonizado [14]

El sistema de sintonizado mencionado previamente se obtiene añadiendo dos pares de imanes “b”, oponiendo las caras del mismo polo magnético. Un imán de cada pareja está fijo a la masa que oscila y el otro a la parte fija. La fuerza magnética creada entre dos imanes que se repelen es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos, de esta forma actúan como un muelle de compresión con una elasticidad dependiente de la distancia. A medida que se acercan, la fuerza repulsiva entre ellos aumenta. Por lo que la frecuencia de oscilación está definida de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k + k'(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (10)$$

Donde ‘k’ representa la elasticidad producida por la repulsión magnética.

Para que el comportamiento del dispositivo no se vea alterado por la dirección del viento, éste tiene que ser axialmente simétrico. Por ello, para conseguir el sintonizado magnético deseado, los imanes deben situarse uno confinado dentro del otro en forma de anillos, donde el anillo de menor diámetro está fijo en el suelo y el exterior está unido al mástil.



*Fig. 3. 9 Imanes confinados*

El aumento de la velocidad del viento provoca una mayor amplitud de oscilación. A medida que aumenta la amplitud de oscilación, la energía potencial acumulada por flexión crece más rápidamente que si fuera un muelle lineal, por lo que la frecuencia de oscilación de todo el sistema aumenta. Debido a este fenómeno el rango de lock-in alcanza mayores valores en el eje horizontal sin necesidad de usar ningún actuador.

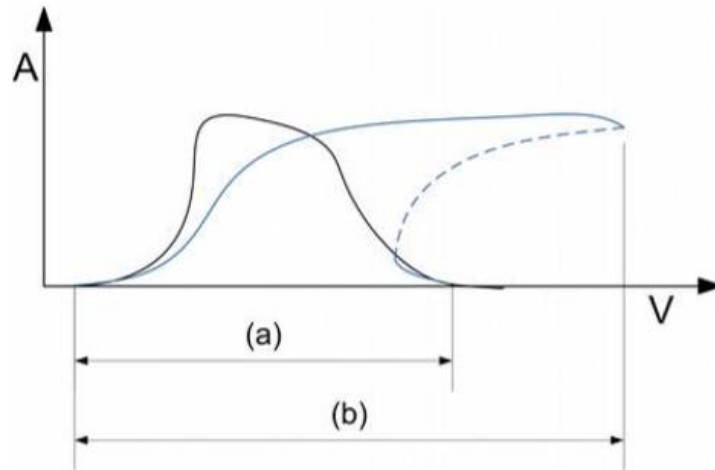


Fig. 3. 10 Rango de lock-in gracias al sistema de sintonizado [14]

Cabe destacar dentro del sistema de sintonizado que, una vez superado el rango de lock-in, el dispositivo se detiene bruscamente. Con lo cual no son necesarios sistemas de frenado para lidiar con fuertes vientos.

Este efecto se produce al salirse del rango de lock-in “por arriba” dado que al aumentar la frecuencia la amplitud va disminuyendo de forma proporcional. Esta frecuencia viene determinada por el número de Strouhal:

$$St = \frac{D}{TU_{\infty}} \quad (11)$$

El cual depende del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (12)$$

Donde ‘U’ es la velocidad del fluido, ‘L’ la longitud característica del cuerpo, ‘ρ’ la densidad del fluido, ‘μ’ la viscosidad, ‘D’ es el diámetro del cilindro, ‘T’ es el período de desprendimiento de los vórtices, y ‘ $U_{\infty}$ ’ la velocidad del fluido aguas arriba del cuerpo. [15]

La frecuencia teórica del desprendimiento de los vórtices se puede determinar con el número de Strouhal, cuya dependencia del número de Reynolds se muestra en las siguientes figuras:

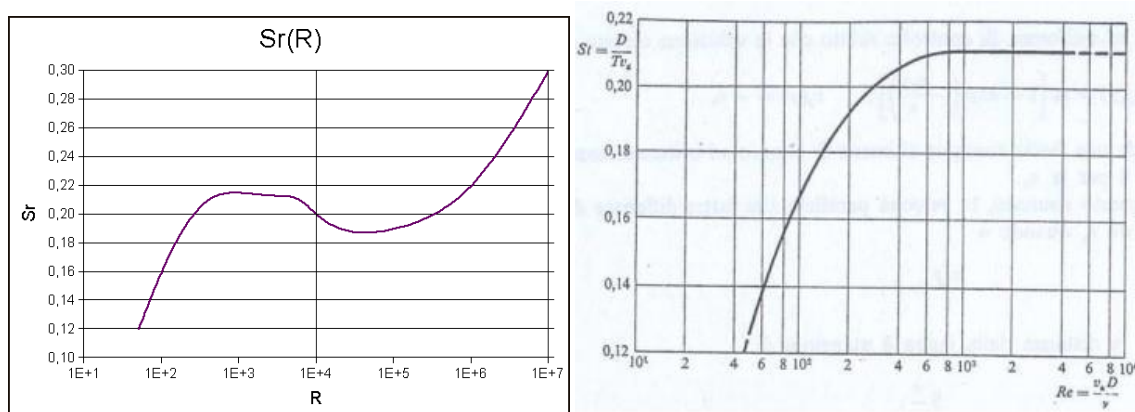


Fig. 3. 11 Relación Strouhal-Reynolds [16]

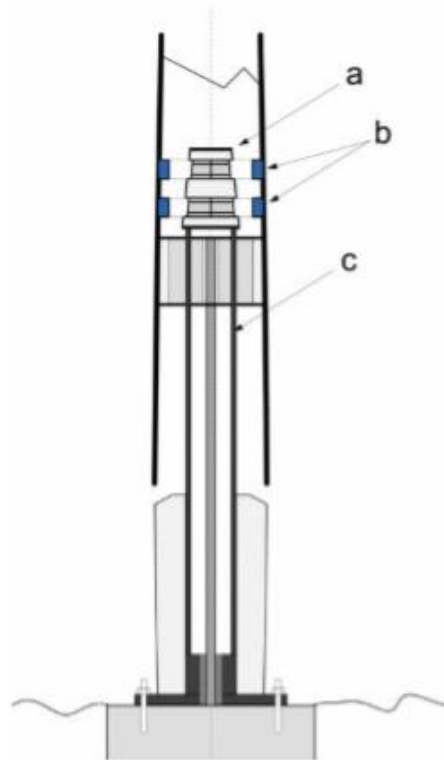
### 3.2.3) Conversión de energía en electricidad

La conversión de energía en electricidad de los aerogeneradores Vortex se realiza utilizando un alternador magnético, haciendo uso de la inducción electromagnética. La ausencia de partes móviles y el movimiento del mástil condicionan el diseño del alternador. Podría pensarse que el momento óptimo para la interacción entre imanes y la bobina tenga lugar en la posición neutra de la oscilación ya que éste es el momento en el que el mástil alcanza mayor velocidad. Sin embargo, este planteamiento produce trayectorias circulares en el movimiento del generador e incluso lleva a la desaparición de la resonancia dado que el sistema busca la trayectoria de menor energía.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el diseño del alternador es la necesidad de mantener la simetría axial. El dispositivo debe comportarse de la misma forma independientemente de la dirección del viento. Por ello, el uso de imanes formando un anillo y fijados al mástil es la mejor forma de colocarlos.

Además, también hay que considerar los beneficios aerodinámicos relacionados con un mástil ligero dada la mayor amplitud y rango de lock-in. El uso del anillo móvil tanto para la generación de potencia como para el sintonizado de la estructura resulta en un ahorro de peso y costes.

La siguiente figura muestra los diferentes componentes del alternador. El anillo de imanes "b" está fijado al mástil. Cuando el mástil es flexionado, la interacción entre las bobinas y los imanes de sintonizado fijados al estátor "a" aumenta. La parte fija del alternador está sujeta por la estructura "c" fijada al suelo. [14]



*Fig. 3. 12 Componentes del alternador [14]*

Como en otros alternadores, la corriente eléctrica se obtiene en AC con amplitud y frecuencia variables, y posteriormente se rectifica y filtra para transformarla en DC.

El objetivo del convertidor de energía del dispositivo es implementar una electrónica que sea capaz de adaptarse a una instalación de energía de la misma manera que lo hace un panel solar FV, de modo que la combinación de ambos dispositivos se pueda hacer fácilmente.

Las especificaciones de salida dependen de las condiciones en las que el dispositivo se utilizará, con la idea principal de suministrar energía a un sistema de almacenamiento como baterías (salida DC). También se pueden utilizar otras aplicaciones como suministro de energía directamente compatibles con la especificación estándar de conexión de red (salida de 110-120/220-230 V ac 50/60 Hz) (fase monofásica/trifásica), pero la solución de transformar una salida DC en una salida AC utilizando una electrónica descendente es una tecnología madura en el mercado.

Considerando el modelo de aerogenerador Vortex Bladeless de 2,75 metros de altura, hay electrónica de control comercial disponible que funciona a 100 W. La estrategia de Vortex es utilizar estos dispositivos electrónicos de control para convertir el voltaje de entrada de corriente alterna en un voltaje de corriente continua similar al VDC de un panel FV de 100 W. El principal reto de esta tarea es disipar la energía cinética cosechada del viento que no se utilizará en ese momento (por ejemplo, en un sistema aislado cuando las baterías se cargan) por una conexión de transmisión alternativa para la energía disipación, utilizando una resistencia de derivación para disipar la energía.

El generador de 100 W requiere un rectificador simple sin necesidad de filtros electrónicos complejos o cualquier electrónica de potencia de control específica para filtrar armónicos. La salida del rectificador no tendrá que ser suavizada por un filtro electrónico para producir una corriente constante. No habrá necesidad de utilizar PWM, MOSFET o rectificadores IGBT. Se utilizará un condensador y un puente de diodos.

El convertidor es el único componente electrónico complejo y se seleccionará un modelo comercial disponible. El rectificador será diseñado para adaptar la salida del alternador al convertidor.

El efecto VIV es causado principalmente por las fuerzas perpendiculares al plano de la estructura oscilante. Cuando el movimiento de la estructura deja de ser perpendicular a la velocidad del viento y comienza a ser rotacional, el rendimiento aerodinámico disminuye.

Una vez rectificada la señal de salida, se definirá un sistema de filtrado. El método estándar para evitar la ondulación en una señal se basa en las características del condensador. Este filtrado es hecho por un sistema de condensador. En un sistema monofásico la caída de voltaje por atenuación de ondulación depende de la frecuencia, y esta es una variable que depende de la velocidad del viento.

En cuanto a los reguladores de carga utilizados en la industria de aerogeneradores, los estándares se ajustan para trabajar en alternadores trifásicos. Esto, desafortunadamente, no es el caso para el diseño del aerogenerador Vortex Bladeless por lo que no se puede adaptar la solución convencional.

La solución consiste en conectar directamente la salida del sistema de rectificador a las baterías. El factor de riesgo de este enfoque es, si la velocidad excesiva del viento se enfrenta a un dispositivo que utiliza esta configuración y que no tienen un equipo de frenado específico, la elevada velocidad destruirá las baterías y los diferentes componentes electrónicos por sobrecarga. En el caso del dispositivo Vortex, existe la ventaja de que, gracias a los fenómenos físicos que controlan el mecanismo de extracción de energía, cuando la velocidad del viento supera un valor específico, los dispositivos salen del rango aerodinámico de lock-in y detienen su funcionamiento. Por esta razón, tras el rectificador y el filtrado, la única energía electrónica añadida necesaria es un controlador de derivación que envía el excedente de energía a un calentador eléctrico, con el objetivo de proteger la instalación aguas abajo.

El objetivo principal del controlador de derivación consiste en redirigir la corriente en los casos de batería sobrecargada. Está compuesto por un diodo zener en serie con una resistencia disipativa del calentador. Ambas están situadas en una fase posterior a la de filtrado. El zener se pondría en conducción en aquellos valores de voltaje que sean superiores a los de trabajo.

### 3.2.4) Fatiga de materiales

Dado que los aerogeneradores Vortex no disponen de partes mecánicas que se puedan deteriorar por fricción, se espera una vida útil mayor a la del resto de aerogeneradores.

Los polímeros con fibra de carbono, plásticos, acero, neodimio y cobre son los principales materiales empleados para fabricar aerogeneradores Vortex. El dispositivo consta de una varilla de carbono expuesta a una fuerza de torsión cíclica, esto provoca posibles fallos del material por fatiga.

Si consideramos un dispositivo que siempre se curve en el mismo plano, con un ángulo máximo y 5Hz de frecuencia de trabajo ininterrumpida. Se estima una esperanza de vida aproximada de 19,83 años de la siguiente fórmula:

$$S_f = a * N^b \quad (13)$$

Cuyos términos se obtienen de:

$$a = \frac{(0,9 * S_{ut})^2}{S'_e} \quad (14)$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log\left(\frac{0,9 * S_{ut}}{S'_e}\right) \quad (15)$$

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{1/b} \quad (16)$$

$$K_t = \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_a}\right) \quad (17)$$

Tomando los siguientes valores: [14]

$S_{ut} = 500 \text{ MPa}; \quad S'_e = 252 \text{ MPa}$

$K_a = 0.96; \quad K_b = 0.94; \quad K_q = 0.98; \quad K_d = 1;$

$K_e = 0.98; \quad K_g = 0.97; \quad K_c = 0.897;$



### 3.2.5) Densidad de potencia

Uno de los principales problemas con las fuentes de energía renovable es la baja densidad de potencia que tienen, es decir, obtienen poca cantidad de energía en relación con su volumen. Se requiere un gran espacio para producir la misma cantidad de energía que con una fuente de energía tradicional en una pequeña instalación.

En lo que respecta a los campos eólicos, se requiere mucha distancia entre turbinas dada la estela producida por sus estructuras. Esta alteración producida por la turbina en la corriente de viento resulta en una disminución de la eficiencia para el resto de los tipos de turbinas, pero no para los aerogeneradores Vortex Bladeless dada su operación oscilatoria.

Estas turbinas sin aspas ofrecen una reducción en la distancia entre dispositivos, permitiendo instalar un mayor número de terminales en menor espacio. Además, teniendo en cuenta que la oscilación de estos aerogeneradores se mantiene alrededor de los 6 o 7 grados, cubrirá un área aproximada de 1 m<sup>2</sup> en total, contando con el tamaño de la turbina y el espacio necesario a su alrededor. [11] En el caso de las turbinas HAWT, esta distancia puede alcanzar 5 diámetros de separación. Se ha comprobado experimentalmente que una distancia entre dispositivos Vortex de la mitad de su altura no causa una alteración reseñable en el funcionamiento del generador.

La tecnología Vortex puede utilizarse en un campo eólico de forma independiente o junto con paneles fotovoltaicos. La combinación con fuentes de energía solar dotaría al consumidor la capacidad de explotar ambas fuentes naturales al mismo tiempo. Esta podría ser una gran solución a la baja densidad de potencia mencionada anteriormente.

Los aerogeneradores Vortex ofrecen una gran oportunidad para trabajar con tecnología fotovoltaica dado su pequeño tamaño y su pequeña sombra proyectada. Cabría esperar que estas instalaciones híbridas incrementasen sus horas productivas respecto a instalaciones meramente eólicas o solares. Por ejemplo, en regiones europeas, grandes instalaciones llegan a conseguir más de 1200 horas de trabajo al año a través de energía solar y más de 1000 de fuentes eólicas; la combinación de ambas fuentes puede incrementar notablemente la producción. [11]

Además, las turbinas Vortex pueden ser integradas fácilmente en instalaciones fotovoltaicas afectando positivamente al LCoE (*Levelized Cost of Energy*), dado que podrías compartir equipamiento y cableado como, por ejemplo, el inversor, el regulador, las baterías...

### 3.2.6) Especificaciones técnicas

Para concluir esta sección de introducción a los aerogeneradores Vortex Bladeless, son incluidas las especificaciones técnicas y la curva de potencia dadas por su ficha técnica. Hay que tener en cuenta que estos valores son orientativos ya que no se ha finalizado su desarrollo. Además, se han realizado pruebas de campo posteriores a la elaboración de esta ficha técnica donde se muestran valores ligeramente distintos.

En este mismo trabajo se contemplan valores distintos como una potencia máxima de 128W en lugar de los 100W de potencia nominal mostrados a continuación. Estas diferencias se deben, en su mayor parte, a que el modelo estudiado se basa en fundamentos teóricos y en la práctica el rendimiento de los aerogeneradores no será ideal y sufrirá pérdidas.

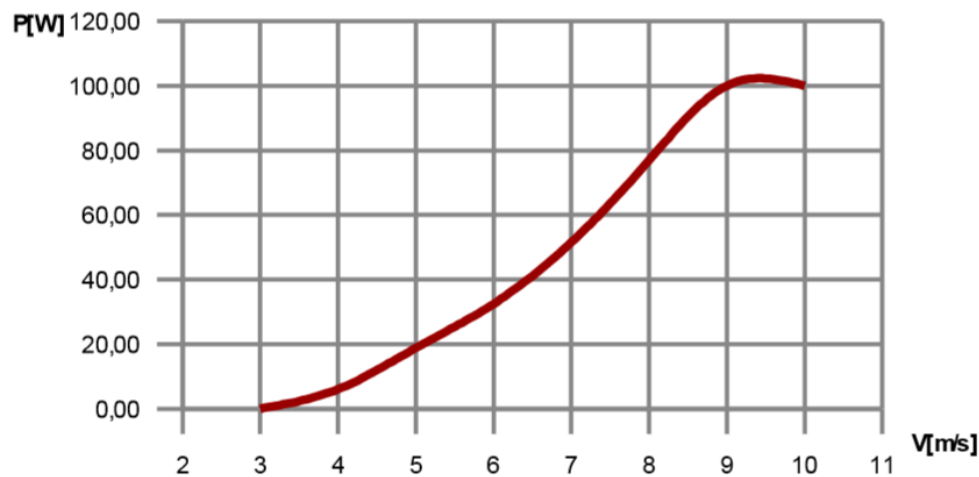


Fig. 3. 13 Curva de potencia teórica

*TABLA 3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS*

<b>KWh/Mes</b> (velocidad media 5,4 m/s)	24	<b>Velocidad de cut-in</b>	3,5 m/s
<b>Potencia nominal</b>	100 W	<b>Velocidad nominal</b>	9 m/s
<b>Potencia máxima</b>	109 W	<b>Frecuencia de oscilación nominal</b>	6,9 Hz
<b>Voltaje nominal</b>	24 Vdc	<b>Máxima velocidad tolerada</b>	35 m/s
<b>Altura total</b>	2,75 m	<b>Área barrida máxima</b>	0,97 m <sup>2</sup>
<b>Diámetro máximo</b>	0,261 m	<b>Rango de temperaturas</b>	-25°C ~ 60°C
<b>Máximo ángulo de amplitud</b>	2,7°	<b>Número de tornillos</b>	5
<b>Frecuencia de oscilación máxima (aprox)</b>	7,5 Hz	<b>Diámetro tornillos</b>	M5
<b>Peso neto</b>	14 kg	<b>Fusible recomendado</b>	10 A
<b>Velocidad de inicio</b>	3 m/s	<b>Rango de ajuste del regulador (aprox)</b>	27,1 Vdc ~ 33 Vdc

## 4) SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Para poder llevar a cabo una simulación del funcionamiento de un campo eólico con los aerogeneradores de Vortex Bladeless será necesario conocer en primer lugar la potencia disponible en el viento, es decir, la cantidad de energía que se puede extraer de determinada área barrida atravesada por el viento. Sumando esta información a la del rendimiento del dispositivo eólico es posible estimar la producción de un aerogenerador bajo determinadas condiciones. Y, finalmente, estudiar el efecto que puede tener la actuación de un dispositivo sobre el rendimiento de los que lo rodean y considerar las diferentes condiciones climáticas de las posibles localizaciones para el emplazamiento del campo eólico con los aerogeneradores Vortex Bladeless. El estudio del funcionamiento de estos dispositivos será llevado a cabo en zonas urbanas donde la eólica convencional tiene un difícil acceso, aprovechando las ventajas de producción y funcionamiento de la microeólica donde se enmarcaría la tecnología desarrollada por Vortex Bladeless, así como su facilidad de instalación y durabilidad.

### 4.1) Potencia disponible en el viento

Para poder llevar a cabo una estimación de la generación de un dispositivo Vortex hay que empezar por calcular la energía que se puede extraer del viento que atraviesa el área barrida por el mástil del generador.

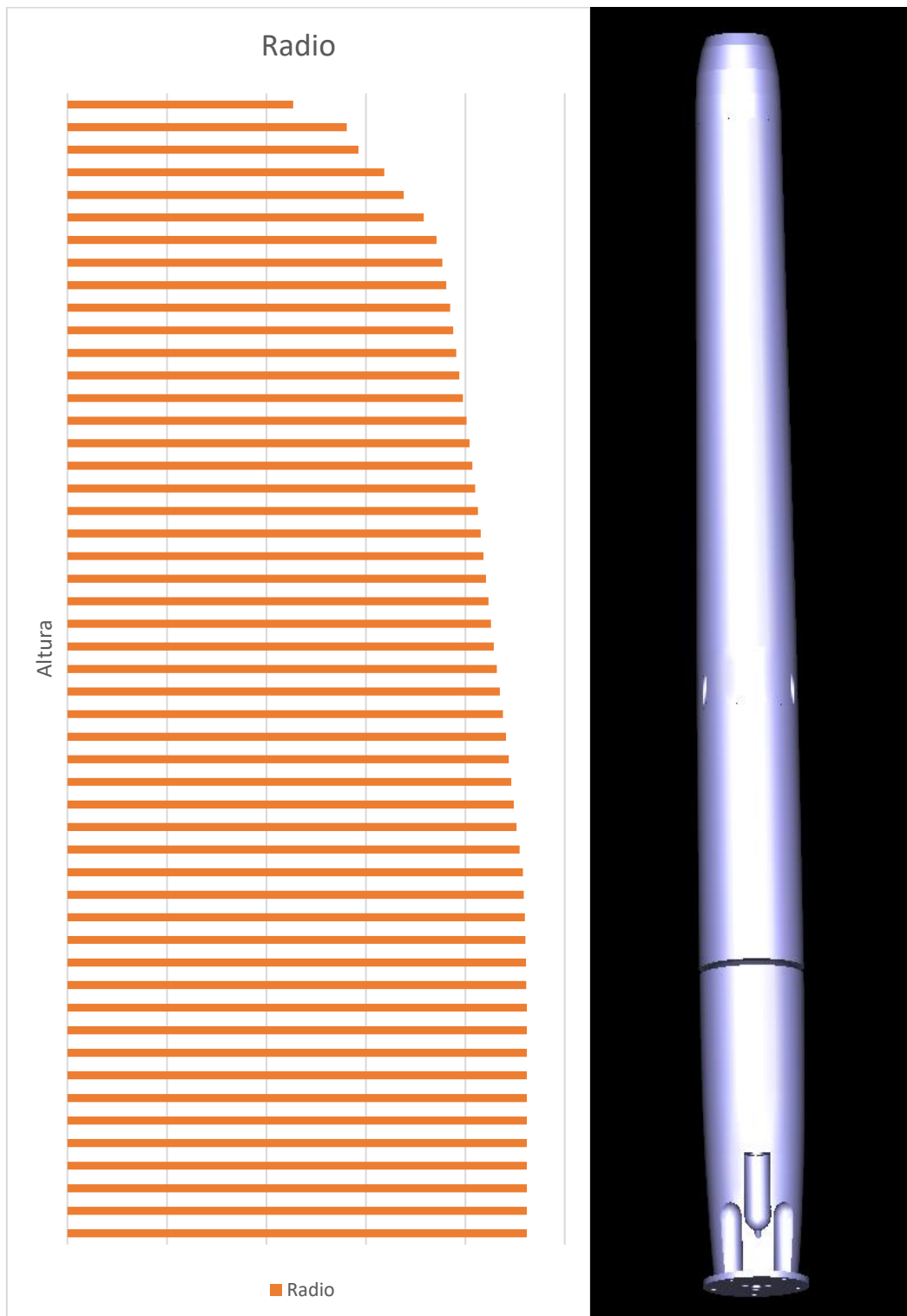
Para ello se parte de las especificaciones dimensionales aportadas por la empresa, las cuales se basan en un aerogenerador de 100 metros de alto al que posteriormente se le aplica un factor de escala para poder estimar su funcionamiento para el caso de dispositivos de menores dimensiones. En este estudio, se analizan tanto dispositivos de 2.75 metros de altura, los cuales están siendo probados actualmente, como la variante de 10 metros de altura con meros objetivos didácticos y para que sirva como base para establecer una predicción del desarrollo que podría alcanzar este producto en el futuro.

Para un dispositivo Vortex Bladeless de 100 m de altura el inicio de mástil se situaría a una altura de unos 25.5 m desde el suelo, a partir de este punto es calculada el área barrida por el aerogenerador. El diámetro viene determinado por la ecuación (8) mostrada en la sección anterior, utilizando como diámetro base “d” los datos facilitados por la empresa que han sido obtenidos de forma experimental y teniendo en cuenta ciertas restricciones como dejar espacio interno para el alternador. A continuación, se muestra la relación entre los generadores de distintas alturas dada por el factor de escala y el perfil del generador en relación con la altura:

*TABLA 4.1 RELACIÓN DE ALTURA*

<b>Altura total (m)</b>	<b>Altura ref (inicio del mástil) (m)</b>	<b>Diámetro base (m)</b>
<b>100</b>	25,5	9,236
<b>10</b>	2,55	0,9236
<b>2,75</b>	0,70125	0,25399

En el siguiente gráfico se muestra el perfil del radio del mástil en función de la altura junto con el diseño final del producto con el objetivo de mostrar el aspecto del dispositivo a analizar:



*Fig. 4. 1 Perfil del mástil del aerogenerador*

Con estos datos, y estableciendo un ángulo máximo de oscilación de 6 grados, 3 hacia cada lado, se puede calcular el área barrida sumando la sección circular producida por la oscilación más la superficie cubierta por el propio dispositivo, cuyo diámetro varía con la altura según la relación mostrada anteriormente. Hay que señalar que en la actualidad ya se están realizando pruebas con un aumento de la oscilación total a 7 grados, pero esta aplicación sigue en fase experimental, aunque con resultados muy positivos hasta el momento dado el aumento del área barrida.

La base de los cálculos del área barrida se muestra a continuación, donde el diámetro  $D$  está determinado por la ecuación (8):

$$\text{Area barrida} = \text{Area dispositivo} + \text{Area oscilación}$$

$$A_{disp} = \int_{h_{ref}}^{h_{max}} D dh = \int_{h_{ref}}^{h_{max}} \left( d_o \left( \frac{v(h)}{v_o} \right) - aX(h) \right) dh \quad (18)$$

$$A_{disp} = \int_{h_{ref}}^{h_{max}} \left( d_o \left( \frac{h}{h_o} \right)^\alpha - a \frac{\pi}{60} (h - h_o) \right) dh \quad (19)$$

$$A_{oscilación} = \frac{\pi R^2 (\text{giro en grados})}{360} = \frac{\pi (h_{max} - h_{ref})^2 (\text{giro en grados})}{360} \quad (20)$$

La potencia disponible en el viento es calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$P_{viento} = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{\frac{m * v^2}{2}}{t} = \frac{v^2}{2t} (v * t * A * \rho) \quad (21)$$

$$P_{viento} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (22)$$

Donde  $A$  es el área barrida,  $\rho$  es la densidad del aire que atraviesa dicha área y  $v$  la velocidad del viento en el instante en que atraviesa el área barrida por el dispositivo.

Para saber la velocidad media a diferentes alturas se utiliza la ley exponencial de Hellman como forma de determinar el perfil vertical del viento:

$$v_h = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (2)$$

En la cual  $v_h$  es a velocidad a la altura  $h$ ,  $v_{ref}$  y  $h_{ref}$  son la velocidad y altura de referencia, respectivamente, y el exponente  $\alpha$  (coeficiente de fricción) se determina experimentalmente y varía con la altura, hora, estación del año, naturaleza del terreno, velocidad del viento y temperatura. Estos son algunos de los valores que toma según las características de la zona a analizar: [17]

TABLA 4.2 COEFICIENTES DE FRICCIÓN [17]

Tipo de paisaje	Coeficiente de fricción $\alpha$
Lagos, océanos, etc.	0,10
Praderas	0,15
Cultivos altos, setos y arbustos	0,20
Tierra muy boscosa	0,25
Pequeña ciudad con árboles y arbustos	0,30
Áreas de ciudad con altos edificios	0,40

La potencia disponible en el viento es directamente proporcional a la velocidad de este, y esta velocidad aumenta a medida que aumenta la altura, esto llevaría a la necesidad de evaluar la distribución de Hellman a lo largo de toda la longitud del mástil del aerogenerador, sin embargo, para los casos a estudiar (2,75 y 10m) el error obtenido utilizando la velocidad media a diferentes alturas es mínimo por lo que esta variación será despreciada y se utilizará la media de velocidades a lo largo del mástil para calcular la potencia disponible en el viento.

Dados los parámetros definidos anteriormente, es posible calcular el área barrida por el generador y la potencia disponible en el viento para distintas velocidades dando lugar a las siguientes gráficas de referencia para los casos de aerogeneradores Vortex Bladeless de 10 y 2,75 metros de altura:

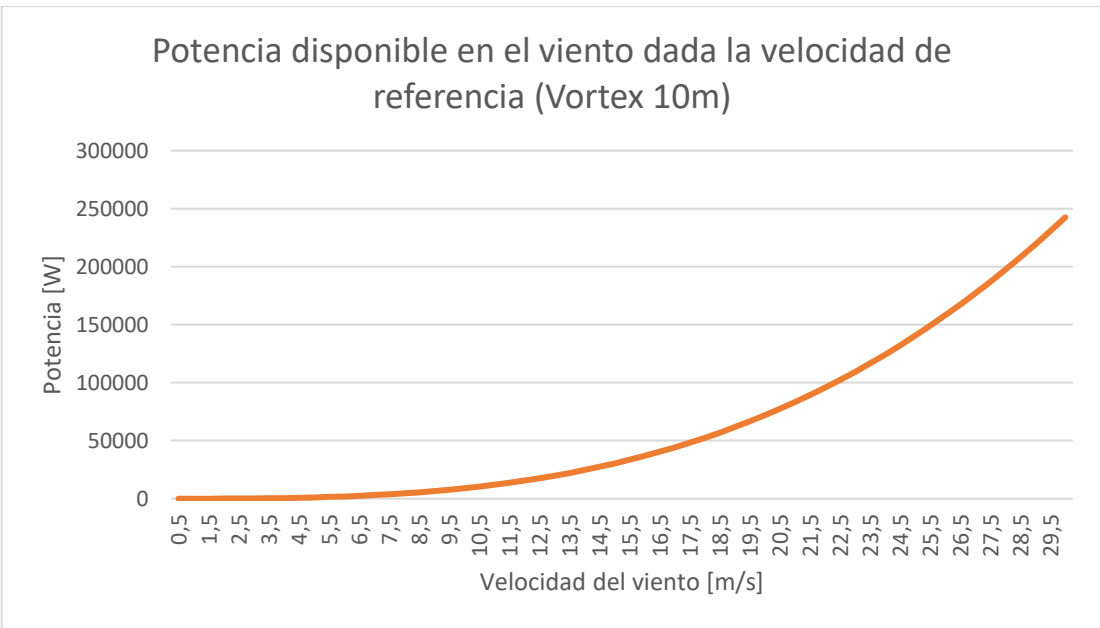


Fig. 4. 2 Potencia disponible en el viento (Vortex 10 m)

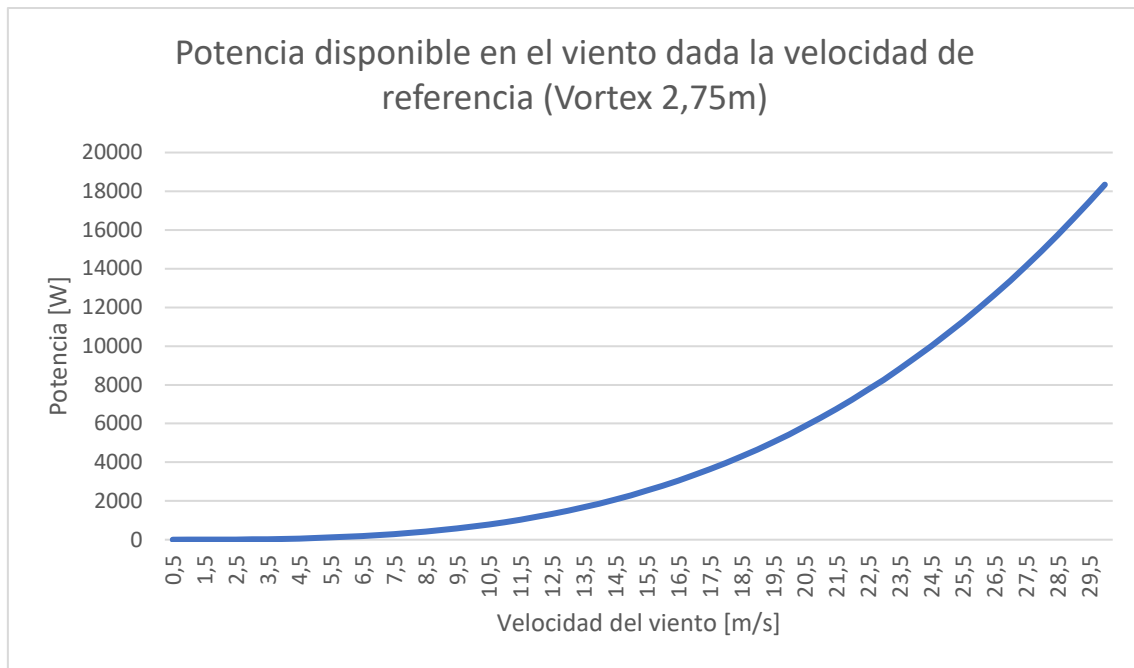


Fig. 4. 3 Potencia disponible en el viento (Vortex 2,75 m)

En estas gráficas se hace visible el efecto del área barrida a la energía que es posible extraer del viento y se hace visible la relación potencia-velocidad. Sin embargo, no toda esta potencia disponible es extraída por los aerogeneradores, como será mostrado más adelante.

#### 4.1.1) Weibull

La velocidad del viento varía continuamente, para ser capaces de predecir la producción de un aerogenerador es necesario saber exactamente la frecuencia con la que el viento sopla y con qué fuerza lo hace. Normalmente, el viento es medido con un anemómetro y la velocidad media del viento se guarda cada 10 minutos. Estos datos se pueden almacenar en diferentes clases de viento de 1m/s cada una. La frecuencia de las distintas clases de viento en un lugar específico se puede expresar según la distribución de frecuencia de Weibull: [18]

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v^k}{A^k}\right) \quad (23)$$

Donde A es el parámetro de escala de Weibull en m/s; una medida de la velocidad característica del viento de la distribución, siendo proporcional a la velocidad media del viento. K es el parámetro de forma; especifica la forma de la distribución y toma valores entre 1 y 3, un valor muy pequeño de k representa vientos muy variables mientras que los vientos constantes están caracterizados por mayores valores de k. Estos dos parámetros son expresados de la siguiente forma: [19]



$$A = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (24)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m}\right)^{-1.086} \quad (25)$$

Donde:  $V_m$  es la velocidad media,  $\sigma$  la desviación típica y  $\Gamma(n)$  la función gamma.

La función gamma es una función factorial que además puede trabajar con fracciones y números complejos. En esta tabla se muestran los valores que toma para un intervalo de  $n$  entre 1 y 2,59:

TABLA 4.3 FUNCIÓN GAMMA [19]

n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
1.00	1.00000	1.40	0.88726	1.80	0.93138	2.20	1.10180
1.01	0.99433	1.41	0.88676	1.81	0.93408	2.21	1.10765
1.02	0.98864	1.42	0.88636	1.82	0.93685	2.22	1.11389
1.03	0.98355	1.43	0.88604	1.83	0.93969	2.23	1.12023
1.04	0.97844	1.44	0.88581	1.84	0.94261	2.24	1.12657
1.05	0.97350	1.45	0.88566	1.85	0.94561	2.25	1.13300
1.06	0.96874	1.46	0.88560	1.86	0.94869	2.26	1.13954
1.07	0.96415	1.47	0.88563	1.87	0.95184	2.27	1.14618
1.08	0.95973	1.48	0.88575	1.88	0.95507	2.28	1.15292
1.09	0.95546	1.49	0.88595	1.89	0.95838	2.29	1.15976
1.10	0.95135	1.50	0.88623	1.90	0.96177	2.30	1.16671
1.11	0.94740	1.51	0.88659	1.91	0.96523	2.31	1.17377
1.12	0.94359	1.52	0.88704	1.92	0.96877	2.32	1.18093
1.13	0.93993	1.53	0.88757	1.93	0.97240	2.33	1.18819
1.14	0.93642	1.54	0.88819	1.94	0.97610	2.34	1.19557
1.15	0.93304	1.55	0.88887	1.95	0.97988	2.35	1.20305
1.16	0.92980	1.56	0.88964	1.96	0.98374	2.36	1.21065
1.17	0.92670	1.57	0.89049	1.97	0.98768	2.37	1.21836
1.18	0.92373	1.58	0.89142	1.98	0.99171	2.38	1.22618
1.19	0.92089	1.59	0.89243	1.99	0.99581	2.39	1.23412
1.20	0.91817	1.60	0.89352	2.00	1.00000	2.40	1.24217
1.21	0.91558	1.61	0.89468	2.01	1.00427	2.41	1.25034
1.22	0.91311	1.62	0.89592	2.02	1.00862	2.42	1.25863
1.23	0.91075	1.63	0.89724	2.03	1.01306	2.43	1.26703
1.24	0.90852	1.64	0.89864	2.04	1.01759	2.44	1.27556
1.25	0.90640	1.65	0.90012	2.05	1.02218	2.45	1.28421
1.26	0.90440	1.66	0.90167	2.06	1.02687	2.46	1.29298
1.27	0.90250	1.67	0.90330	2.07	1.03164	2.47	1.30188
1.28	0.90072	1.68	0.90500	2.08	1.03650	2.48	1.31091
1.29	0.89904	1.69	0.90678	2.09	1.04145	2.49	1.32006
1.30	0.89747	1.70	0.90864	2.10	1.04649	2.50	1.32934
1.31	0.89600	1.71	0.91057	2.11	1.05161	2.51	1.33875
1.32	0.89464	1.72	0.91258	2.12	1.05682	2.52	1.34830
1.33	0.89338	1.73	0.91467	2.13	1.06212	2.53	1.35798
1.34	0.89222	1.74	0.91683	2.14	1.06751	2.54	1.36770
1.35	0.89115	1.75	0.91906	2.15	1.07300	2.55	1.37755
1.36	0.89018	1.76	0.92137	2.16	1.07857	2.56	1.38754
1.37	0.88931	1.77	0.92376	2.17	1.08424	2.57	1.39807
1.38	0.88854	1.78	0.92623	2.18	1.09000	2.58	1.40844
1.39	0.88785	1.79	0.92877	2.19	1.09585	2.59	1.41895

Y la desviación típica se obtiene a partir de la siguiente función:

$$\sigma = [(V - V_m) * f]^{0.5} \quad (26)$$

## 4.2) Rendimiento del aerogenerador

Para calcular la potencia producida por la turbina será necesaria la potencia disponible en el viento y un factor de rendimiento aerodinámico  $C_p$ . El factor  $C_p$  está referido al rendimiento aerodinámico exclusivamente, en ningún caso incluye factores relativos al rendimiento eléctrico o de otro tipo.

Con el objetivo de determinar el amortiguamiento del sistema y el rendimiento aerodinámico de éste la empresa Vortex Bladeless realizó diversas pruebas mediante las cuales se desea estimar el rendimiento aerodinámico del modelo para un amortiguamiento dado. Para ello se combinan dos series de experimentos. La primera orientada al cálculo del amortiguamiento del sistema, en donde se enfunda la varilla con diferentes espumas que emulan diferentes valores de amortiguamiento introducido por el alternador y la segunda en donde se calcula la potencia disipada en dichas espumas (para diferentes amortiguamientos) cuando el modelo trabaja en estacionario. Así, el área barrida y la velocidad del aire son conocidas y la única potencia inyectada al sistema es la absorbida por el modelo del aire.

### Cálculo de la constante de amortiguamiento:

Con el túnel de viento parado se flexiona el modelo hasta un ángulo semejante al de máxima oscilación en estacionario y se libera dejándolo oscilar libremente durante 10 ciclos de oscilación completos. Se considera un modelo armónico amortiguado y los datos adquiridos se ajustan por medio de una regresión exponencial del tipo:

$$Y = A * e^{-bt}$$

En la siguiente figura se muestra una de las lecturas experimentales para el cálculo del amortiguamiento y su ajuste (en verde). Las lecturas (azul) se aproximan a una función de ajuste utilizando la frecuencia como único parámetro susceptible de ser promediado dado su carácter acumulativo:

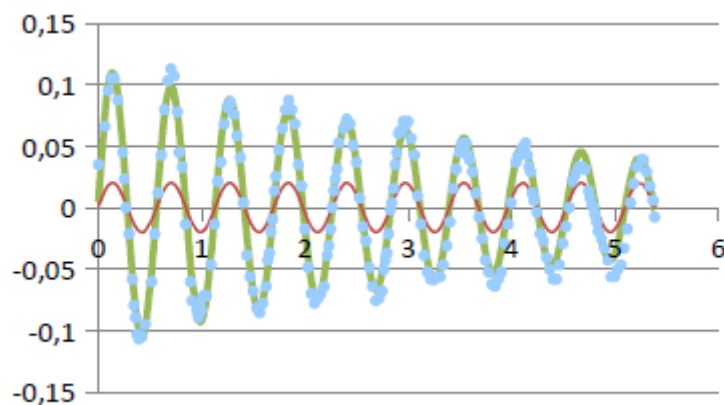


Fig. 4. 4 Lecturas para el cálculo del amortiguamiento

### Cálculo del coeficiente de potencia, $C_p$ :

Con el túnel de viento en funcionamiento y para diferentes velocidades de aire se calcula la potencia del viento presente en el área barrida por el dispositivo, así como la potencia disipada para el factor de amortiguamiento obtenido anteriormente.

En este gráfico se muestra la variación de coeficiente de potencia  $C_p$  en función de la velocidad del viento:

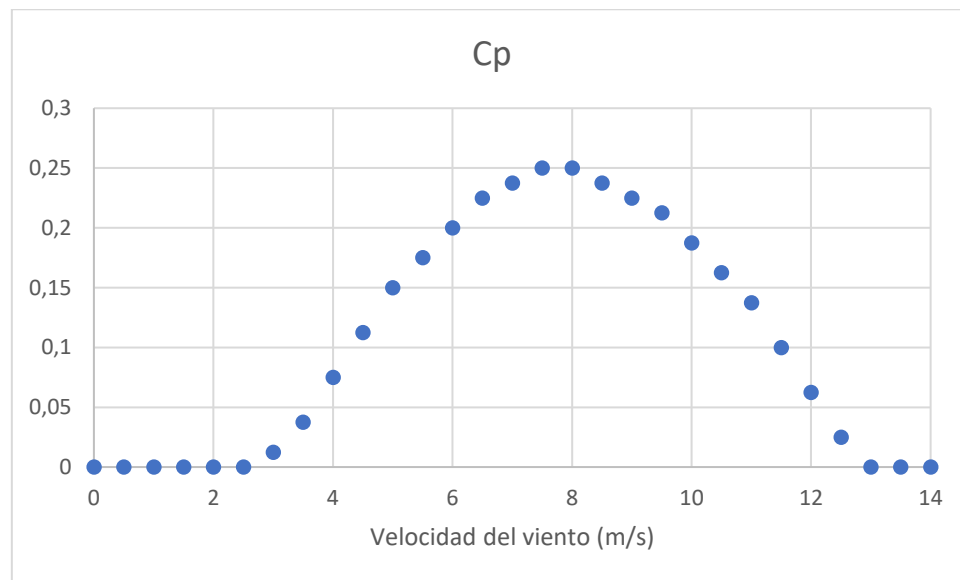


Fig. 4. 5 Valor experimental de  $C_p$

Con base en la experimentación mostrada, los siguientes datos del coeficiente de potencia fueron obtenidos para realizar este estudio:

*TABLA 4.4 COEFICIENTE DE POTENCIA*

<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	<b>C<sub>p</sub></b>
0	0
0,5	0
1	0
1,5	0
2	0
2,5	0
3	0,0125
3,5	0,0375
4	0,075
4,5	0,1125
5	0,15
5,5	0,175
6	0,2
6,5	0,225
7	0,2375
7,5	0,25
8	0,25
8,5	0,2375
9	0,225
9,5	0,2125
10	0,1875
10,5	0,1625
11	0,1375
11,5	0,1
12	0,0625
12,5	0,025
13	0

Al multiplicar este factor por la potencia disponible en el viento se obtiene la curva de potencia del dispositivo. Además, utilizando la distribución de Weibull explicada anteriormente, se puede estimar la producción anual de cada aerogenerador teniendo en cuenta la frecuencia con la que se dan las distintas velocidades del viento en una localización específica.

A continuación, se muestran las curvas de potencia para los modelos de aerogeneradores Vortex Bladeless de 2,75 y 10 metros de altura. La curva de potencia del dispositivo de 10 metros de altura es mucho mayor a la del modelo de menos tamaño debido al incremento del área barrida.

### Curva de potencia aerogenerador 2,75 m

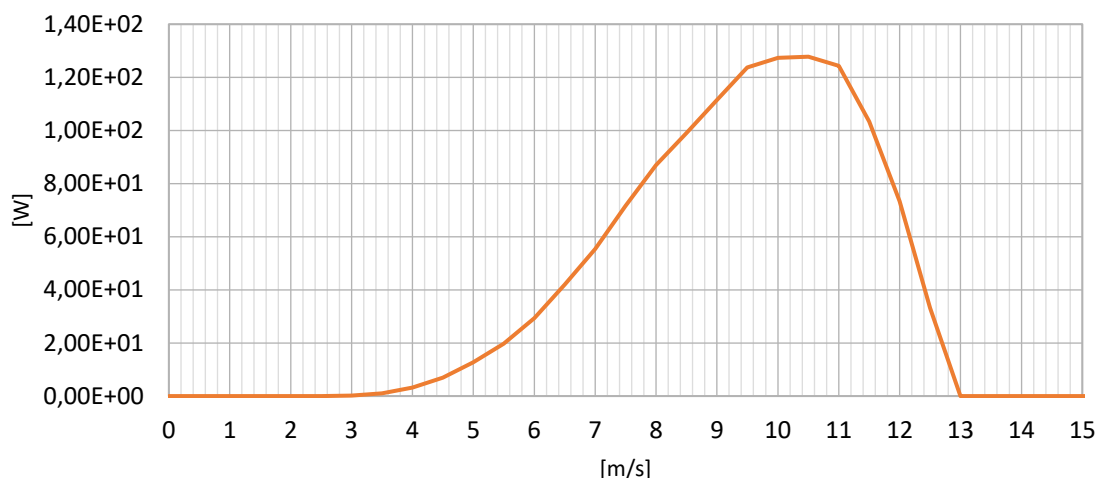


Fig. 4. 6 Curva de potencia aerogenerador 2,75 m

### Comparativa de curvas de potencia para los dos modelos

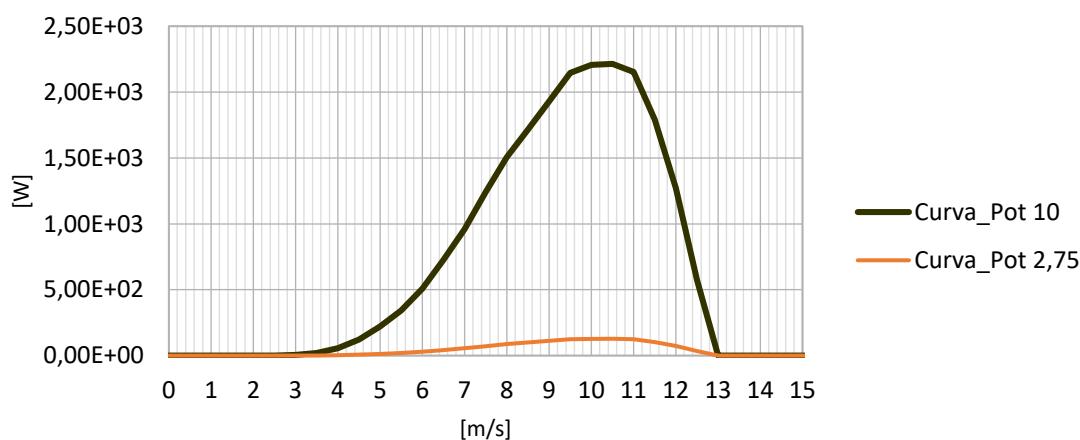


Fig. 4. 7 Comparativa curvas de potencia

De estas curvas es posible extraer la capacidad máxima de cada tipo de aerogenerador, siendo 128 W para el de 2,75 metros de altura y 2,21 KW para el modelo de 10 metros de altura. Esta capacidad máxima viene determinada por la velocidad a la que el coeficiente de potencia, junto con la propia velocidad del viento es mayor, teniendo lugar en torno a 10 – 10,5 m/s.

Tras la fase de obtención de energía hay que considerar la transformación de ésta en electricidad y su posterior almacenamiento o ingreso en la red eléctrica. Este proceso basado en el sistema del alternador utilizado por Vortex Bladeless no corresponde al tema a tratar en este estudio. Pero como esta información es necesaria para comprender el funcionamiento del dispositivo en su conjunto, es explicada brevemente en la introducción teórica del dispositivo.

### 4.3) Turbulencias en el campo eólico

Para rentabilizar las explotaciones eólicas hay que encontrar el lugar idóneo para su instalación, identificando los sitios de mayor potencial eólico e intentando situar el mayor número de aerogeneradores posible. Las turbulencias creadas por un aerogenerador Vortex pueden afectar al rendimiento y por tanto a la producción del resto de turbinas a la hora de trabajar conjuntamente como parte de un parque eólico. Aunque las propiedades de la turbulencia del viento son conocidas, la naturaleza estocástica del viento hace difícil reproducir y evaluar el efecto de la turbulencia.[20]

Actualmente los estudios acerca del efecto de la proximidad de los dispositivos Vortex Bladeless está en desarrollo por lo cual, con el objetivo de establecer ciertos criterios con los que diseñar el campo eólico y su distribución, la teoría y simulaciones serán extrapoladas de diversos estudios previos.

De acuerdo con los estudios tanto de Prasanth como de Revstedt, para el caso de dos cilindros alineados, la respuesta del cilindro aguas arriba es cualitativamente similar a la del caso aislado, sin embargo, el cilindro que se encuentra aguas abajo se ve sometido a una mayor amplitud de oscilación. [21] A esto hay que añadir el estudio realizado por Borazjani, que observa mayores amplitudes y mayor rango de lock-in para el caso de dos cilindros.[22]

Según el estudio de Ren-Jie Jiang denominado “Flow-induced vibrations of two tandem cylinders in a channel” a medida que el ratio de separación es aumentado, las interacciones estructura-fluido se desacoplan y los cilindros del estudio se comportan como cilindros aislados. Para esta publicación tiene en cuenta los siguientes parámetros: el número de Reynolds ( $Re = \frac{UD}{\nu}$ ), el ratio de bloqueo ( $\beta = D/H$ ) que relaciona el diámetro del cilindro con el ancho del túnel, el ratio de masa ( $m^* = \frac{4m}{\pi\rho D^2}$ ) donde  $m$  es la masa del cilindro y  $\rho$  la densidad del fluido, y la separación horizontal entre los cilindros  $\frac{S}{D}$ . En el esquema se muestra el planteamiento gráfico utilizado en los experimentos de Ren-Jie Jiang con las distintas magnitudes utilizadas en los cálculos. [23]

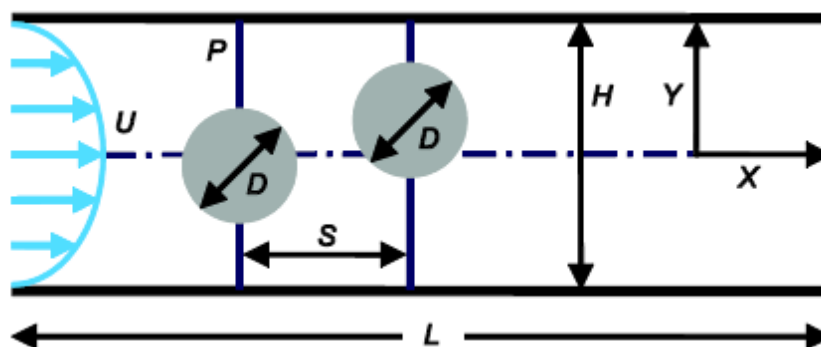


Fig. 4. 8 Planteamiento gráfico estudio Ren-Jie Jiang [23]

Con los parámetros explicados anteriormente se realizaron una serie de mediciones, el resultado mostrado a continuación corresponde al estudio con  $m^*=1$  y  $Re=100$ , donde

se muestran los contornos de vorticidad y la evolución temporal del desplazamiento transversal.

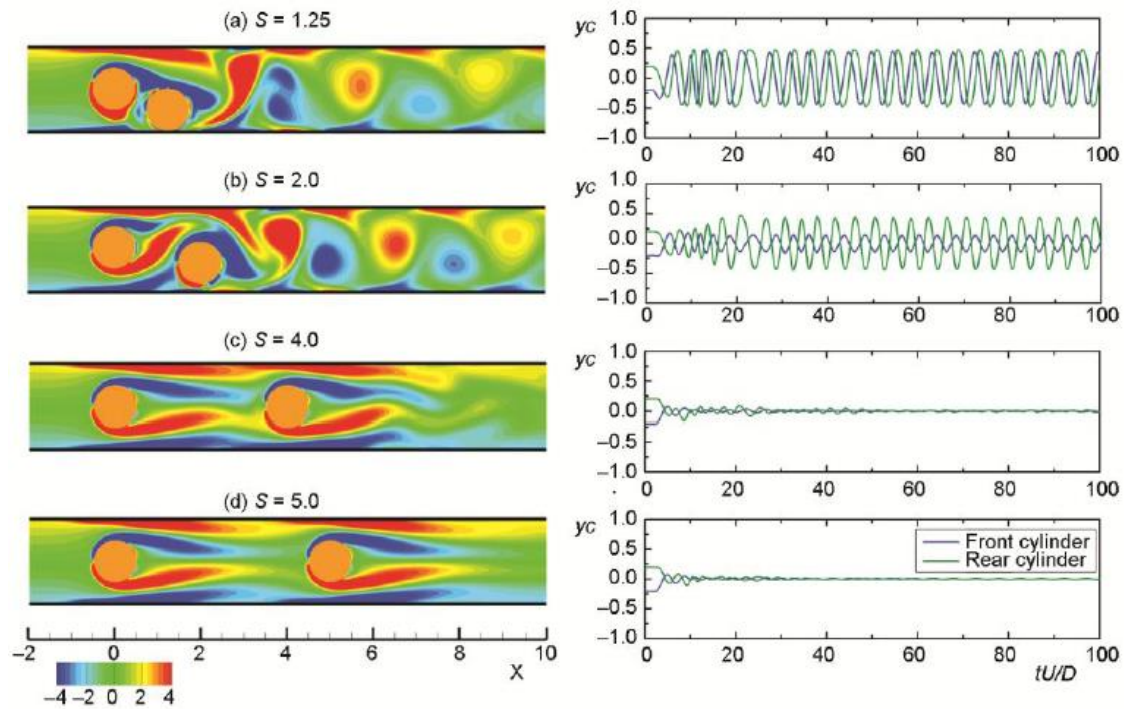


Fig. 4. 9 Mediciones estudio Ren-Jie Jiang [23]

Se puede apreciar que con la configuración con la que se obtiene mayor amplitud sería para una ratio de separación de 1,25. Y llegando a una ratio  $S/D$  de 5 los vórtices formados corresponden al caso de cilindros aislados. Para los aerogeneradores de Vortex Bladeless, el caso de  $S/D = 1,25$  correspondería a una separación de 0,29 m para una altura del dispositivo de 2,75 m y de 1,05 m para el caso de 10 m de altura. Y una ratio de  $S/D$  de 5 estaría caracterizada por una distancia entre aerogeneradores de 1,15 y 4,18 m para una altura de 2,75 y 10 m respectivamente. Sin embargo, la ratio  $m^*$  en el caso de un aerogenerador Vortex se encuentra en torno a 62 tanto para el dispositivo de 2,75 metros de altura como para el de 10 metros, por lo que estos resultados se toman como datos indicativos, pero no son directamente aplicables al modelo a estudiar.

En otro estudio, Alper Cesur analiza el comportamiento de una composición de cuatro cilindros en formación cuadrática en un canal con  $Re = 400$  distribuidos de la siguiente forma:



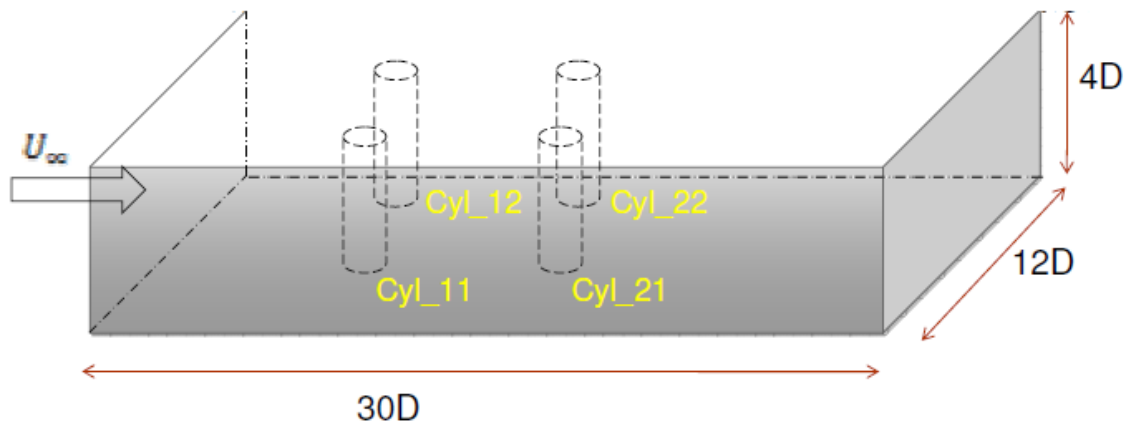


Fig. 4. 10 Planteamiento gráfico estudio Alper Cesur [24]

Sus experimentos reflejan como la influencia del desprendimiento de vórtices de los cilindros aguas arriba es muy fuerte en los cilindros aguas abajo, mostrando una amplitud hasta un 80% mayor que la del cilindro aguas arriba cuyo comportamiento es similar al del caso del cilindro aislado. Para este estudio han utilizado datos normalizados y la velocidad reducida que corresponde a la forma  $U^* = U/(f_N D) = 1/f_N^*$ , donde  $f_N^*$  es la frecuencia natural de vacío del sistema.

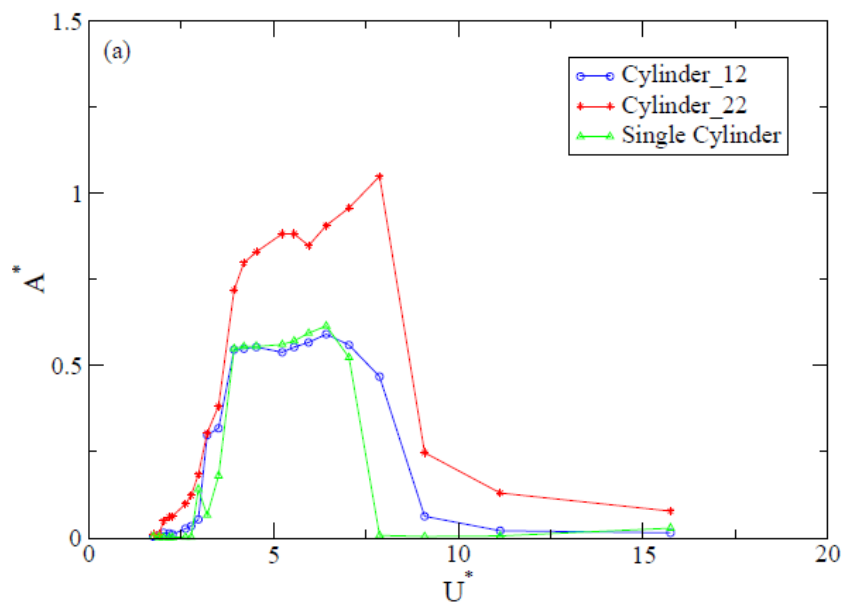


Fig. 4. 11 Resultados estudio Alper Cesur [24]

También se puede observar como ambos cilindros tienen un mayor rango de sincronización que en el caso del cilindro aislado.

Además, comparando los resultados en función de la distancia de separación entre cilindros se aprecia que los cilindros aguas abajo oscilan con mayor amplitud para el



caso de  $L/D = 4$  que para el de 5, siendo  $L$  la longitud de separación y  $D$  el diámetro de los cilindros. Estos resultados se muestran en la siguiente tabla:

*TABLA 4.5 RESULTADOS ALPER CESUR [24]*

	$L/D = 4$				
	$U^* = 7.044$	$U^* = 4.547$	$U^* = 3.937$	$U^* = 3.215$	$U^* = 2.273$
$Cyl_{12}$	$A^* = 0.542$	$A^* = 0.572$	$A^* = 0.535$	$A^* = 0.135$	$A^* = 0.085$
$Cyl_{22}$	$A^* = 1.188$	$A^* = 0.862$	$A^* = 0.755$	$A^* = 0.433$	$A^* = 0.075$
	$L/D = 5$				
$Cyl_{12}$	$A^* = 0.559$	$A^* = 0.554$	$A^* = 0.546$	$A^* = 0.298$	$A^* = 0.011$
$Cyl_{22}$	$A^* = 0.957$	$A^* = 0.829$	$A^* = 0.719$	$A^* = 0.305$	$A^* = 0.063$

En el caso de los aerogeneradores Vortex, una separación de  $L/D = 4$  correspondería a unos 3,35 metros para el caso de 10 metros de altura, y 0,92 metros para el de 2,75.

Como resultado del análisis de los estudios previos con respecto al comportamiento del fenómeno de desprendimiento de vórtices y dados los ensayos realizados en laboratorio, como estimación de la separación entre dispositivos es considerada una distancia alrededor de 0,9-1,4 metros para los aerogeneradores de 2,75 metros y entre 3,3 y 5 metros para los de 10 metros de altura.

Pese a que resultados no son definitivos y más pruebas tendrán que ser realizadas para determinar el impacto exacto en el rendimiento, todo parece indicar que la suma de los rendimientos de dos generadores trabajando conjuntamente en cualquier caso es mayor que la energía generada por separado. El cuerpo situado aguas arriba podría oscilar ligeramente menos que si estuviese aislado mientras que el que está aguas abajo tiene mayor oscilación, pero la suma de los dos interaccionando generaría más de dos veces uno aislado. Estos aumentos de amplitud y oscilación son muy beneficiosos de cara a aumentar el área barrida y con ello la generación, sin embargo, al contemplar este aumento de la amplitud en el dispositivo el espacio del alternador se vería reducido y la fatiga de la varilla central podría aumentar, por lo que cabe la posibilidad de que haya que adaptar los dispositivos una vez sean obtenidas las conclusiones definitivas en este aspecto.

Tras esta reflexión, para los cálculos de escenarios concretos que se tratan a continuación se utilizará una separación de 1 y 4 metros para los dispositivos de 2,75 y 10 metros de altura respectivamente. Con esta distancia se considera que la energía obtenida será la del caso de un aerogenerador aislado dado que se prevé que la interferencia podría resultar en un aumento de la producción (que no será considerado en base al principio de prudencia), pero no hay ningún resultado que parezca indicar ninguna posible reducción en el rendimiento. Bien es cierto que a medida que el viento se encuentra con más obstáculos, la energía disponible en el mismo se reduce, lo que puede provocar un descenso en la producción de los aerogeneradores a medida que aumenta el número de dispositivos en el campo eólico. Este “gasto” de la energía disponible en el viento no es considerado en los cálculos posteriores debido a la dificultad de su análisis sin herramientas de simulación o instalaciones similares funcionando previamente.

No obstante, en el caso de los aerogeneradores de 2,75 metros de altura, el valor utilizado como radio de la circunferencia para calcular la distancia ente aerogeneradores será de la mitad de la separación definida de 1 metro con el objetivo de calcular el área necesaria para cada dispositivo considerando que, si la distancia desde cada aerogenerador es de medio metro la separación total entre cada par de dispositivos será de 1 metro, cumpliendo con las condiciones mostradas en los estudios previos. Con esto, el área necesaria por cada generador corresponde a una circunferencia de 0,785 m<sup>2</sup>.

Del mismo modo, para los dispositivos de 10 metros de altura, la separación ha de ser de unos 4 metros, por lo que el área mínima necesaria para cada uno será la de una circunferencia de 2 metros de radio, es decir, 12,57 m<sup>2</sup>.

#### 4.4) Emplazamiento del campo eólico

A continuación, serán determinadas las distintas localizaciones dónde se llevarán a cabo los cálculos de las simulaciones de un campo eólico utilizando aerogeneradores Vortex Bladeless. Como primera aproximación y a modo orientativo, las velocidades medias de viento que pueden ser encontradas en Europa a lo largo del año serán analizadas. Cada velocidad tiene asociada un potencial de viento (W/m<sup>2</sup>) calculado a partir de diferentes parámetros como la densidad del aire, la superficie y las distintas direcciones en las que sopla el viento. Las velocidades medias que se dan con mayor frecuencia en Europa se encuentran en el rango entre 4 y 6 m/s a unos 50 metros por encima del nivel del suelo, por lo que el aerogenerador tendrá que ser adaptado a estas condiciones. El rango operativo del dispositivo se muestra como un factor determinante y a partir de éste se podrá obtener el output total que el aerogenerador podrá proporcionar. [11]

El mapa mostrado a continuación recoge las características del viento y la velocidad media a lo largo de un año en diferentes regiones europeas a 50 metros de altura sobre el nivel del suelo:

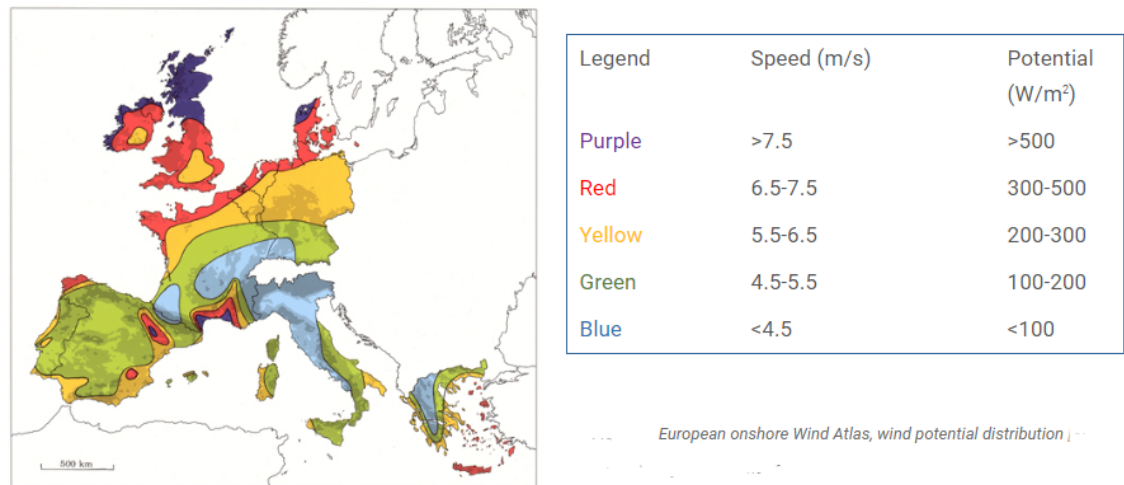


Fig. 4. 12 Mapa europeo de vientos [11]

El potencial del viento es una magnitud que determina cuál sería la máxima energía que se puede extraer de un determinado viento dada su velocidad. Sin embargo, ningún tipo de aerogenerador puede recoger toda la energía del viento ya que lo detendría. Dependiendo del tipo de turbina se puede obtener una mayor o menor energía del viento, siendo el límite de Betz (59,3%) explicado con anterioridad en este estudio el límite máximo que un aerogenerador puede aprovechar.

Los dos aspectos más importantes a la hora de escoger la ubicación de un campo eólico son la frecuencia del viento y su velocidad. Como punto de partida para elegir las distintas localizaciones donde se puedan utilizar los campos eólicos Vortex Bladeless se utilizan estos mapas que reflejan tanto el viento medio anual como la densidad de potencia media anual disponible en el viento, ambos medidos a 30 metros de altura sobre el suelo, obtenidos del atlas eólico del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA).

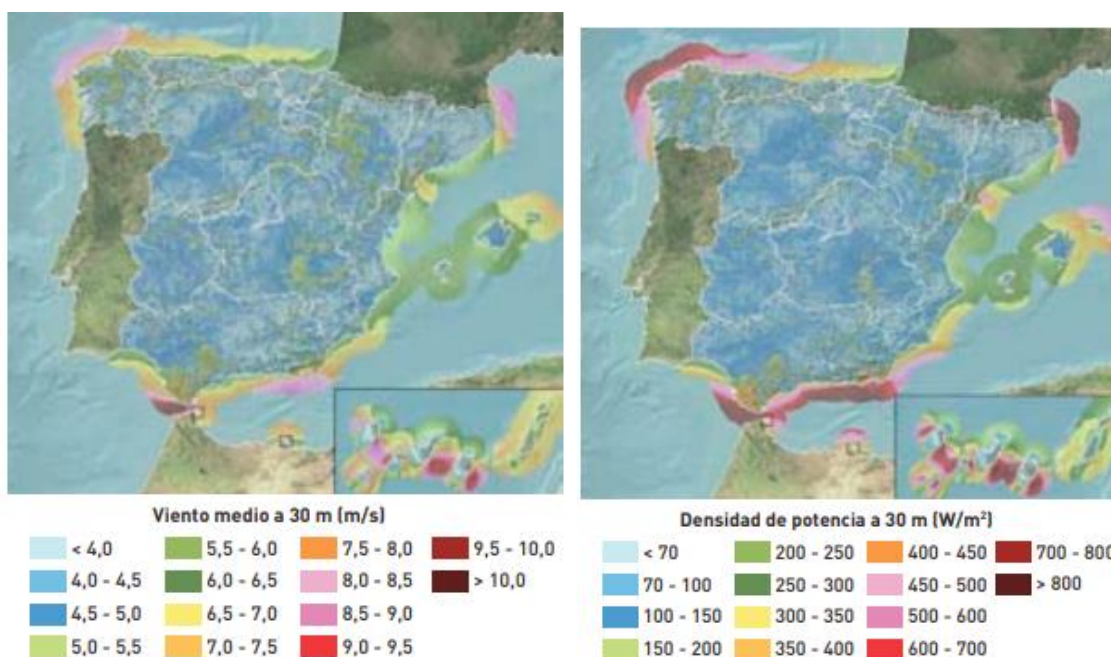


Fig. 4. 13 Velocidad y densidad de potencia del viento en España a 30 metros de altura [25]

En estos mapas se aprecia una baja velocidad del viento media en la mayor parte del territorio español a 30 metros de altura sobre el nivel del suelo. Dada la baja velocidad de cut-in de los aerogeneradores Vortex Bladeless alrededor de los 3,5 m/s, se puede aprovechar esta energía eólica en el interior del país, especialmente en zonas urbanas aprovechando estas bajas velocidades y su elevada densidad de instalación, que permite situar una mayor cantidad de dispositivos en superficies más pequeñas que la eólica convencional.

Durante el análisis de los siguientes casos de estudios, se realizará el mismo tipo de procedimiento, el cual consta de las siguientes fases:

- Estudio de la superficie disponible y cálculo del número de aerogeneradores
- Análisis de la distribución del viento
- Cálculo de la energía generada

Este procedimiento será mostrado con mayor detalle en el primer escenario de estudio, que corresponde al caso de San Nicasio, Leganés. Y será repetido para el resto de casos.

#### 4.4.1) Casos Leganés

Uno de los casos a tratar está localizado en Leganés, donde será analizada la potencia generada por un campo eólico con la tecnología de Vortex Bladeless. Dentro de esta localización se lleva a cabo el estudio de la producción potencial en el Colegio Fernando Abril Martorell de la Fundación Carlos III y también el caso de un campo híbrido utilizando los paneles fotovoltaicos ya instalados en uno de los edificios de la Universidad Carlos III de Madrid.

El siguiente mapa muestra la distribución de la velocidad del viento a 80 metros de altura en la comunidad de Madrid, donde la media anual se sitúa cerca de los 5 m/s. En la zona de Leganés esta velocidad es ligeramente superior a la del resto de la comunidad autónoma, rozando los 6 m/s de media anual. Aplicando la ley exponencial de Hellman (2) para hallar la velocidad media a 30 metros de altura, y con un coeficiente de fricción  $\alpha$  de 0,1 dado el poco rozamiento a dicha altura, se obtiene una velocidad media cercana a los 5,5 m/s, este valor será utilizado como valor genérico de referencia para estudiar los casos localizados en Leganés.

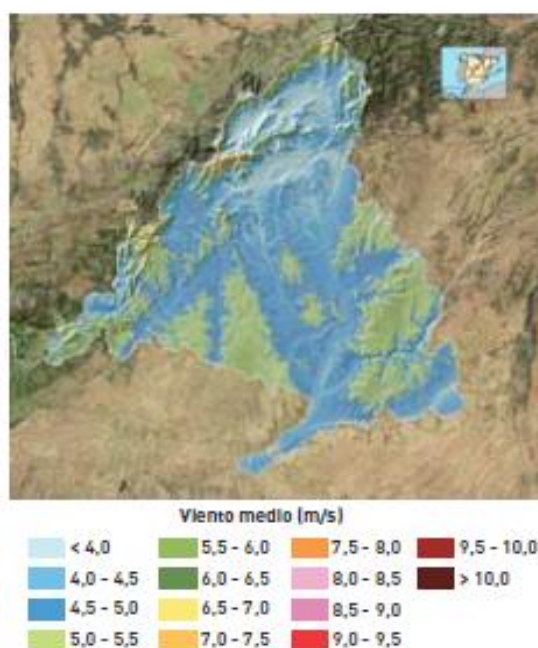


Fig. 4. 14 Velocidad del viento en Madrid a 80 metros de altura [25]



#### 4.4.1.1) Caso CMU Fernando Abril Martorell (San Nicasio)

En primer lugar, es evaluado el espacio disponible para la instalación en el Colegio Mayor Universitario Fernando Abril Martorell, situado en San Nicasio, Leganés. A través de la herramienta online CalcMaps basada en Google Maps se obtiene la superficie disponible desde la toma aérea del tejado del edificio que corresponde a 2696 metros cuadrados. La precisión de este método es desconocida y, con el objetivo de mostrar los cálculos de una forma más clara, la superficie aproximada utilizada será de 2700 m<sup>2</sup>.

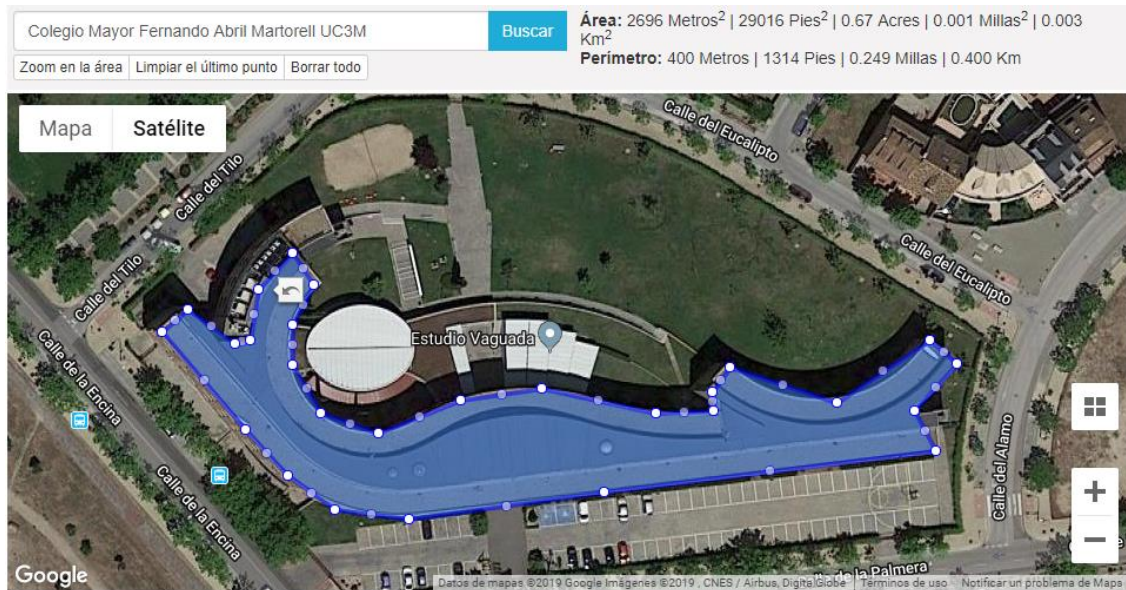


Fig. 4. 15 Toma aérea superficie utilizable CMU Fernando Abril Martorell

#### **Aerogenerador Vortex Bladeless de 2,75 metros de altura**

##### **Estimación del número de aerogeneradores**

Dada la superficie mostrada en la imagen y el espacio necesario por aerogenerador definido previamente, basado en una circunferencia de 1 metro de radio, podrían ser instalados alrededor de 3437 aerogeneradores Vortex Bladeless en la superficie del tejado de esta residencia universitaria. Sin embargo, esta estimación no es del todo correcta debido a que la forma irregular del tejado imposibilita el cálculo directo del número de turbinas por la simple división de la superficie disponible entre el área necesaria para el correcto funcionamiento del aerogenerador. Por lo tanto, aplicando el principio de prudencia, la superficie utilizada para cada aerogenerador será la estimada por la empresa Vortex Bladeless de 1 m<sup>2</sup>, conformando así un campo eólico de 2700 aerogeneradores aproximadamente. Dado el número de dispositivos instalados y la capacidad máxima calculada para aerogenerador en la curva de potencia, 128 W para este tipo de aerogenerador, la capacidad de la instalación completa es de 345 KW.

### Cálculo de la distribución del viento:

La velocidad media anual registrada en Leganés a 30 metros de altura es de 5,5 m/s aproximadamente. El edificio del Colegio Mayor consta de 3 plantas más una cuarta subterránea, y estimando una altura de 4 metros por planta construida la altura total del edificio será definida como 12 metros.

Utilizando la ley exponencial de Hellman se puede obtener la velocidad del viento a 13,375 metros de altura a partir de los datos de referencia a 30 metros, que equivale a la suma de los 12 metros del edificio más la mitad de la altura del aerogenerador:

$$v_{13} = v_{30} \left( \frac{h_{12}}{h_{30}} \right)^{\alpha}$$

Donde el coeficiente de fricción se encontrará entre 0,25 y 0,30 según la literatura [17], por lo que será utilizado un valor medio de 0,275:

$$v_{13} = 5,5 * \left( \frac{12}{30} \right)^{0,275} = 4,4 \text{ m/s}$$

El siguiente paso para el cálculo de la producción se basa en la función de densidad de Weibull explicada anteriormente. Dada la procedencia de los datos de viento utilizados en este estudio, la desviación típica de las velocidades es desconocida, imposibilitando un cálculo directo del factor de forma 'k'. Debido a esto, se utiliza un valor medio de 2 sabiendo que oscila entre 1 y 3 donde 1 refleja vientos muy variables y 3 muy constantes.

Una vez estimado el valor del factor de forma se determina el factor de escala 'A' con una función gamma correspondiente a  $n = 1,5$  y la velocidad media obtenida de la ley exponencial de Hellman. En este escenario el factor de escala toma un valor de  $A = 4,965$ .

Estos datos, implementados en la fórmula de la distribución de Weibull, dan lugar a la siguiente tabla de densidad de probabilidad  $f(v)$  y su acumulada  $F(v)$ :

TABLA 4.6 WEIBULLL

Weibull	Función Densidad	Acumulada
V (m/s)	f(v)	F(v)
0	0	0
0,5	0,040159	0,01009083
1	0,077911025	0,03975649
1,5	0,111087938	0,08723683
2	0,137966313	0,14979134
2,5	0,157413212	0,22396085
3	0,168955069	0,3058834
3,5	0,172765692	0,39162421
4	0,169581953	0,47748098
4,5	0,160565792	0,56023266
5	0,147137061	0,63731087
5,5	0,130802792	0,70688585
6	0,113005224	0,76787082

6,5	0,095004518	0,81985867
7	0,077804241	0,86301037
7,5	0,062120009	0,89791717
8	0,048385578	0,92545673
8,5	0,036786737	0,94665978
9	0,027311902	0,96259825
9,5	0,019808921	0,9743008
10	0,014039631	0,98269633
10,5	0,009726445	0,98858312
11	0,006588057	0,99261846
11,5	0,004363682	0,99532332
12	0,002826947	0,99709652
12,5	0,001791507	0,99823359
13	0,001110745	0,99894694
13,5	0,000673842	0,99938481
14	0,000400033	0,99964783

### Distribución de Weibull 13,375 metros de altura

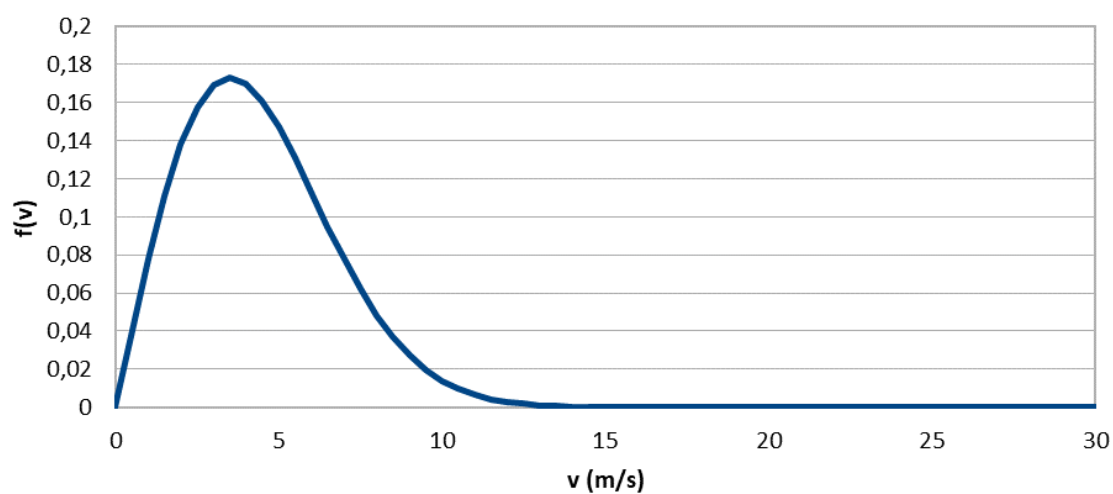


Fig. 4. 16 Distribución de Weibull a 13,375 metros de altura

### Cálculo de la energía generada

Con la curva de potencia y la función de densidad es posible calcular la energía anual generada para cada velocidad del viento por dispositivo:

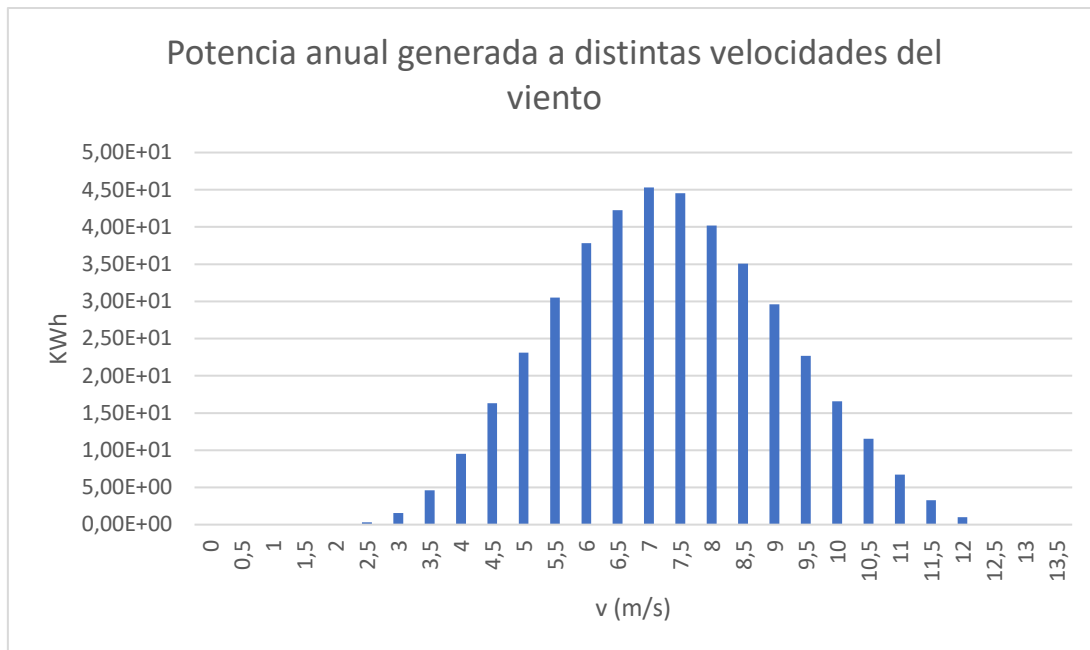


Fig. 4. 17 Potencia anual generada a distintas velocidades del viento

Y la energía total anual para un generador viene dada por el sumatorio de la energía obtenida para cada velocidad del aire dentro del rango de trabajo del aerogenerador. Dando lugar a una generación de potencia de 0,35 MWh anuales para cada aerogenerador Vortex Bladeless de 2,75 metros de altura colocado en la ubicación correspondiente al tejado del Colegio Mayor Fernando Abril Martorell, Leganés.

Teniendo en cuenta las referencias mostradas con anterioridad según las cuales el rendimiento de los dispositivos no se verá reducido por las interferencias inducidas entre ellos al trabajar conjuntamente en un campo eólico, la producción final del campo eólico será la correspondiente a 2700 aerogeneradores, dando lugar a una producción anual de 945 MWh.

### **Aerogenerador Vortex Bladeless de 10 metros de altura**

A modo orientativo también se puede calcular la producción de los aerogeneradores de 10 metros de altura, aunque éstos todavía no hayan sido probados. La separación entre ellos ha de ser de unos 4 metros, por lo que el área mínima necesaria para cada uno será la de una circunferencia de 2 metros de radio, es decir, 12,57 m<sup>2</sup>. Igual que en el caso de los dispositivos de menor tamaño, la distribución a lo largo del tejado no permite aprovechar todo este espacio por lo que el número de aerogeneradores a colocar será menor. Para tener en cuenta esta limitación se utilizará una superficie por dispositivo de 13 m<sup>2</sup>, dejando espacio en esta localización para colocar 207 aerogeneradores.

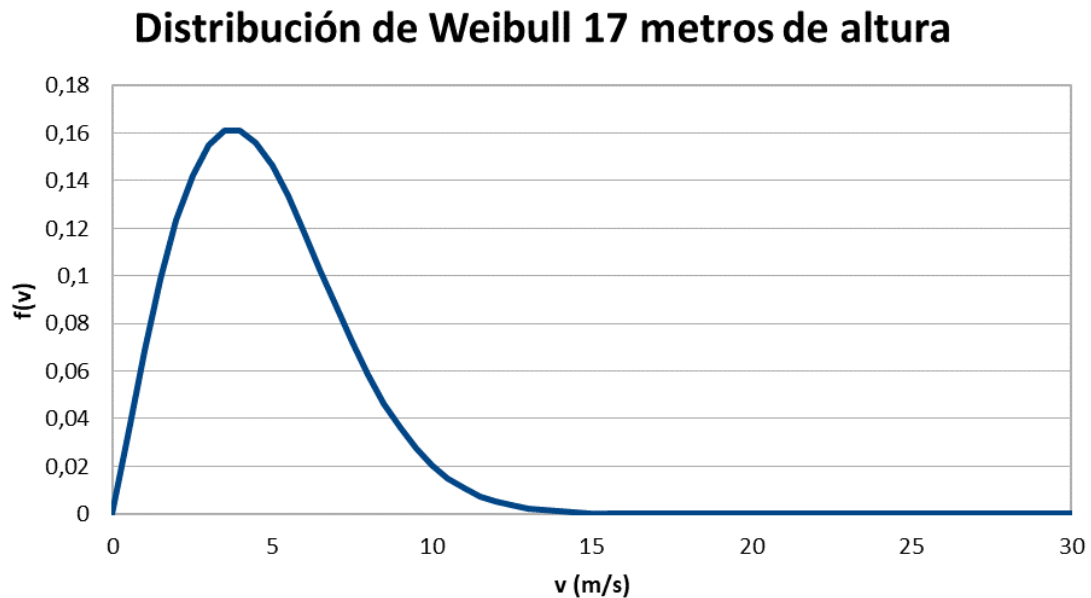
Dada la capacidad máxima de un aerogenerador Vortex Bladeless de 10 metros de altura (2,21 KW), la capacidad instalada de este escenario de estudio será de 457 KW.

Para calcular la velocidad media del viento se vuelve a utilizar la ley exponencial de Hellman, pero en este caso a la altura media del aerogenerador, que será de 17 metros.



$$v_{17} = 5,5 * \left(\frac{17}{30}\right)^{0,275} = 4,7 \text{ m/s}$$

El factor de forma de la distribución de Weibull utilizado seguirá siendo  $k = 2$  dando lugar a un factor de escala  $A = 5,303$ .



*Fig. 4. 18 Distribución de Weibull a 17 metros de altura*

Siendo la potencia generada por un solo dispositivo 7,32 MWh al año y la total para este campo eólico 1,52 GWh/año.

#### **4.4.1.2) Caso Universidad Carlos III de Madrid**

Al igual que en el caso anterior, a través de la herramienta online CalcMaps es obtenida la superficie disponible desde la toma aérea del tejado del edificio que corresponde a 7775 metros cuadrados. Hay que descontar la superficie de los distintos patios interiores de los que dispone esta localización, estimada en 2500 m<sup>2</sup> y de las placas fotovoltaicas que formarán parte de la instalación híbrida eólica y solar, que constituyen una superficie de unos 550 m<sup>2</sup>. Con lo que la superficie final disponible para la instalación es de 4725 m<sup>2</sup>.

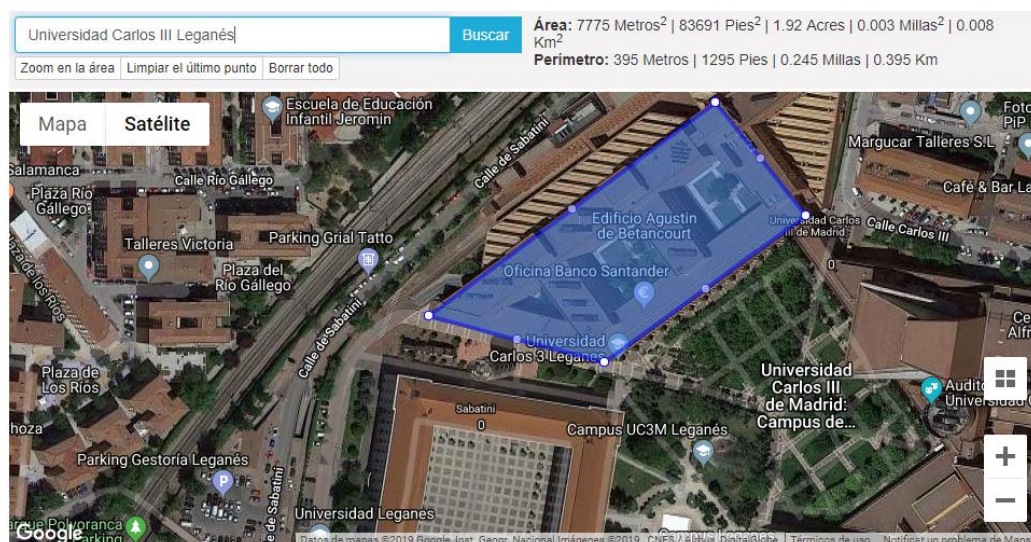


Fig. 4. 19 Toma aérea superficie utilizable Universidad Carlos III, Leganés

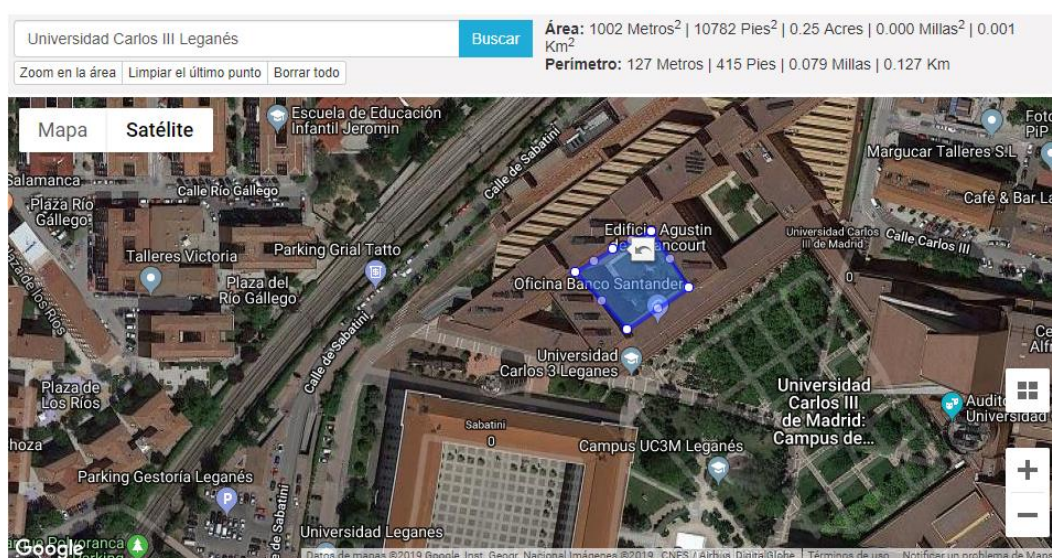


Fig. 4. 20 Toma aérea superficie no utilizable Universidad Carlos III, Leganés

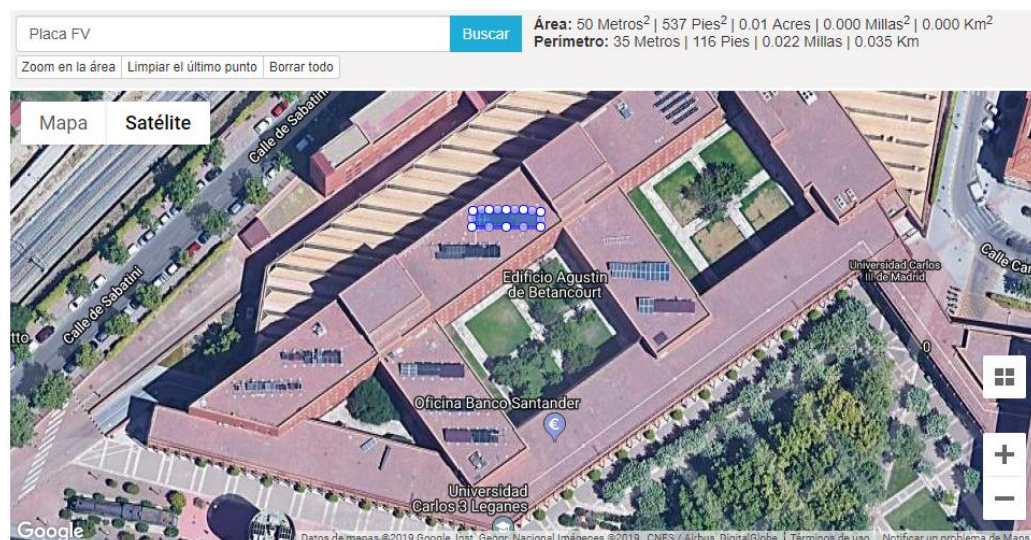


Fig. 4. 21 Toma aérea superficie ocupada por placas solares Universidad Carlos III, Leganés

### **Aerogenerador Vortex Bladeless de 2,75 metros de altura**

El espacio necesario para cada dispositivo Vortex Bladeless estará determinado por un área de 1 m<sup>2</sup> para los dispositivos de 2,75 metros de altura. Al disponer de una superficie de 4725 m<sup>2</sup> el número máximo de aerogeneradores instalados será 4725, y utilizando la misma altura media por planta que en el caso anterior, 4 metros, se obtiene una altura aproximada de 16 metros para este edificio de 4 plantas.

Como en el caso anterior, la velocidad media anual registrada en Leganés a 30 metros de altura es de 5,5 m/s aproximadamente.

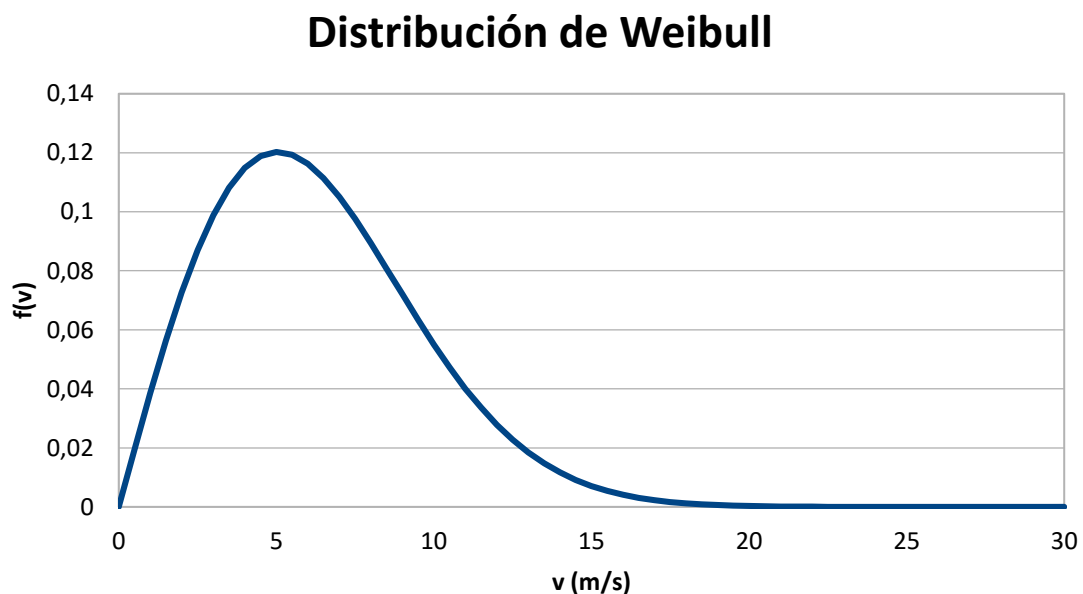
Para obtener la velocidad media del viento a la que se ve sometido el aerogenerador se utiliza la ley exponencial de Hellman. Esta velocidad ha de ser calculada a una altitud que considere la altura del edificio, 16 metros, y la mitad de la altura del dispositivo, 1,375; es decir, una altura total de 17,375 metros:

$$v_{17} = v_{30} \left( \frac{h_{17}}{h_{30}} \right)^{\alpha}$$

Para  $\alpha = 0,275$ :

$$v_{17} = 5,5 * \left( \frac{17,375}{30} \right)^{0,275} = 4,73 \text{ m/s}$$

Se mantiene el criterio para el factor de forma en la distribución de Weibull  $k = 2$  y con ello el factor de escala  $A$  es igual a 5,34 m/s. Dando lugar a la siguiente distribución de Weibull:



*Fig. 4. 22 Distribución de Weibull a 17,375 metros de altura*

La curva de potencia será la misma que para el primer caso estudiado ya que no depende de las condiciones externas, pero dada la mayor velocidad del viento debido a una mayor altura de la localización, la producción de un aerogenerador será de 0,43 MWh al año. Lo que supone una producción anual alrededor de 2 GWh por parte de los



aerogeneradores Vortex Bladeless cuya capacidad instalada en este escenario es de 605 KW.

### **Aerogenerador Vortex Bladeless de 10 metros de altura**

Como ha sido mostrado con anterioridad, la separación entre los aerogeneradores ha de ser de unos 4 metros, por lo que el área mínima necesaria para cada uno será la de una circunferencia de 2 metros de radio, es decir, 12,57 m<sup>2</sup>. La superficie utilizada para el cálculo del número de dispositivos será de 13 m<sup>2</sup> debido a que no toda la superficie puede ser aprovechada en base a los problemas geométricos de distribución que pudieran surgir en la instalación. El número de turbinas Vortex Bladeless que es posible instalar dada la superficie de 4725 m<sup>2</sup> serán unas 360. Este número de aerogeneradores da lugar a una capacidad instalada de 796 KW.

La velocidad a una altura de 21 metros, de los cuales 16 corresponden a la altura del edificio y 5 a la mitad de la altura del aerogenerador será:

$$v_{21} = 5,5 * \left(\frac{21}{30}\right)^{0,275} = 4,99 \approx 5 \text{ m/s}$$

Lo que lleva a un factor de escala A de 5,642 teniendo en cuenta la estimación del factor de forma k con valor 2.

La producción anual de este aerogenerador será de 8,48 MWh, componiendo un campo eólico con una producción de 3,05 GWh al año.

### **Instalación híbrida**

Este edificio de la Universidad Carlos III de Madrid sobre el cual se han basado los cálculos cuenta actualmente con una instalación de paneles fotovoltaicos en el tejado de la instalación. Es por ello por lo que resulta de interés analizar el comportamiento y la producción de esta instalación trabajando junto con las dos hipotéticas instalaciones de dispositivos Vortex Bladeless.

En cuanto a la interacción entre ellos, se puede observar desde el punto de vista de los aerogeneradores o desde el de la instalación fotovoltaica:

- La interferencia de las placas solares podría ser considerada como un obstáculo para el viento, variando su velocidad y generando mayor turbulencia que la ya estimada para el campo eólico. Dado que la altura de los paneles es en cualquier caso muy inferior a la de los aerogeneradores, y que actualmente la distancia necesaria para el funcionamiento eficaz de los dispositivos Vortex está siendo considerada en los cálculos de la distancia entre ellos, estas posibles interacciones serán despreciadas.
- En cuanto a la posible disminución de producción de los paneles solares dada la sombra producida por los aerogeneradores. En el caso de los dispositivos de 2,75 metros de altura, su diámetro ronda los 23 cm y están distribuidos con una separación superior a la de una circunferencia de 1 m de radio, por lo que la

posible sombra proyectada afectará mínimamente al funcionamiento de la instalación fotovoltaica. Sin embargo, es cierto que los aerogeneradores Vortex de 10 metros de altura, cuyo diámetro medio asciende a 84 cm, podrían generar mayores problemas al respecto. Debido a que el foco principal de este proyecto está basado en la producción de los dispositivos Vortex Bladeless y no en instalaciones fotovoltaicas, todas estas interacciones serán despreciadas de cara a la simulación del funcionamiento.

Como estimación de la producción de los paneles solares instalados en la localización seleccionada se han extraído datos medios de producción y rendimiento. Según la web “panelessolaresfotovoltaicos.org” los paneles promedio tienen una superficie cercana a los 1,65 m<sup>2</sup> y tienen una capacidad promedio de 250 W. [26]

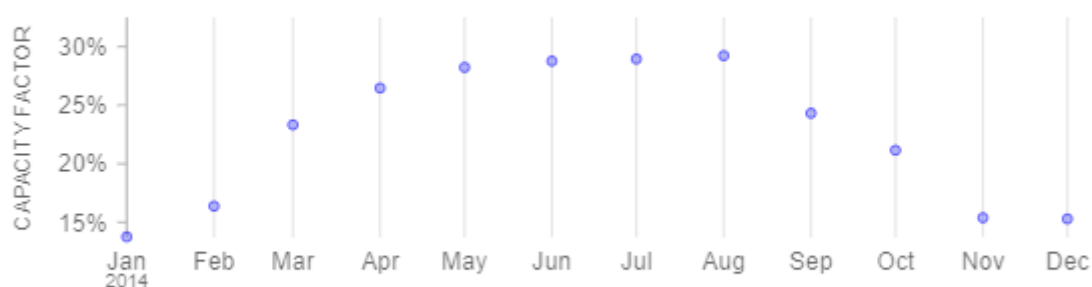
La superficie fotovoltaica empleada en la actualidad en este edificio de la universidad ocupa una superficie de 550 m<sup>2</sup> de acuerdo con la estimación realizada por satélite, esto da lugar a una capacidad de potencia instalada de 85 KW aproximadamente.

El output final de esta instalación se ha calculado utilizando una herramienta online desarrollada por investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich y del Imperial College de Londres con el nombre “renewables.ninja”, la cual se basa en 30 años de datos meteorológicos. Esta herramienta permite estimar el factor de potencia, el cual varía bastante para los sistemas fotovoltaicos dependiendo de la ubicación. Generalmente, está en el rango de 10-25%. [27]

Los parámetros introducidos para llevar a cabo la estimación son los siguientes:

- Base de datos: CM-SAF SARAH (Europe)
- Pérdidas en el sistema: Se asume un sistema sin pérdidas
- Tracking: No
- Inclinación: 35 grados
- Orientación: Sur

### Monthly capacity factor



Total mean capacity factor: 22.7%

Fig. 4. 23 Rendimiento de los paneles solares en la Universidad Carlos III, Leganés

Para estimar la energía producida por las placas solares es necesario conocer la irradiación disponible en el emplazamiento de las placas fotovoltaicas. El siguiente gráfico muestra la energía disponible en Madrid por unidad de superficie y mes del año a lo largo de un día completo. Esta información ha sido obtenida del atlas de radiación solar de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), que utiliza los datos del SAF para el control del Clima liderado por el servicio meteorológico alemán. Y para las aproximaciones realizadas con posterioridad se utilizarán los datos de irradiación directa y difusa ponderados en el cálculo de la irradiación global.

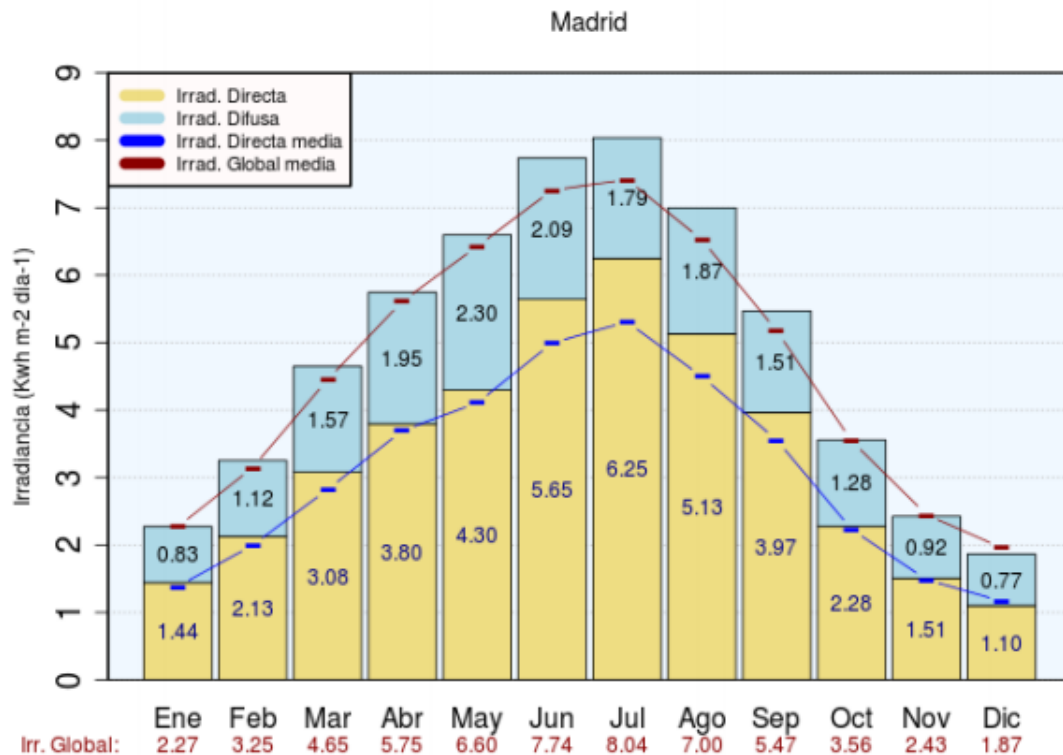


Fig. 4. 24 Irradiación disponible en Madrid [28]

Se puede apreciar una producción mucho mayor en los meses de verano que en invierno, tanto por la variación del factor de potencia como por la evidente variación de energía solar disponible.

Finalmente, la producción estimada para un año de funcionamiento será de 242 MWh que servirán de apoyo a la producción de los aerogeneradores y dotarán al sistema de mayor estabilidad al aumentar las horas de producción de la instalación.

Asumiendo la posible instalación conjunta de los paneles solares y los aerogeneradores Vortex Bladeless podría llegar a realizarse una instalación híbrida en los dos distintos escenarios de dispositivos eólicos y despreciando la bajada de producción provocada por la sombra proyectada en los paneles fotovoltaicos:

- Instalación híbrida con aerogeneradores de 2,75 metros: 2,24 GWh/año con una capacidad instalada de 690 KW.
- Instalación híbrida con aerogeneradores de 10 metros: 3,29 GWh/año con una capacidad instalada de 881 KW.

Este tipo de instalación híbrida plantea dos ventajas principales:

- Equipamiento y cableado como, por ejemplo, el inversor, el regulador y las baterías podrían ser compartido, reduciendo el LCoE (Levelized Cost of Energy).
- Ayudaría a estabilizar la producción dado que es de esperar que las instalaciones híbridas incrementasen sus horas productivas respecto a instalaciones meramente solares o eólicas, incrementando notablemente la producción.

#### 4.4.2) Caso Cádiz

Como caso para analizar la producción de un campo eólico con la tecnología de Vortex Bladeless en una ubicación urbana con un potencial eólico muy elevado se estudiará el caso de un edificio en la provincia de Cádiz, Andalucía. En esta zona la velocidad media del viento ronda los 8 m/s medidos a 80 metros de altura según el atlas eólico del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), del que se ha obtenido el siguiente mapa de la distribución del viento en Andalucía. Por medio de la ley exponencial de Hellman, y con un coeficiente de fricción  $\alpha$  de 0,1 debido al poco rozamiento a dicha altura y la cercanía al mar, la velocidad media del viento a 30 metros corresponde a 7,25 m/s.

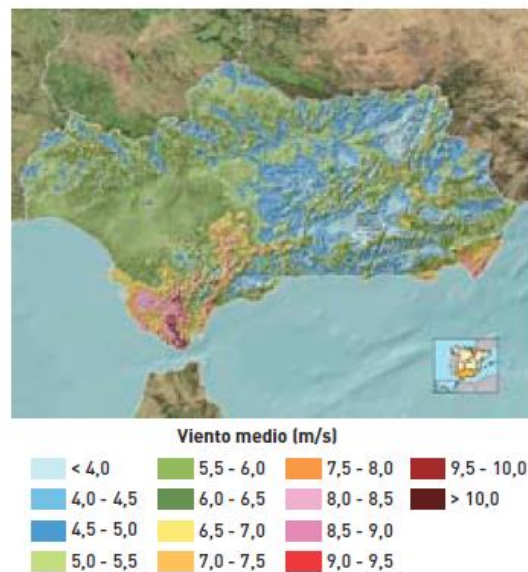


Fig. 4. 25 Velocidad del viento en Cádiz a 80 metros de altura [25]

Para esta simulación de la producción ha sido elegida una localización aleatoria en Cádiz debido al elevada velocidad media del viento en esta zona de España; en este caso un edificio residencial situado en la avenida Duque de Nájera con el objetivo de reflejar también el potencial que puede tener esta tecnología de cara a su uso para particulares, el cual consta de 4 plantas por lo que será utilizada una altura orientativa de 16 metros (4 metros por planta).

La velocidad media del viento a las diferentes alturas de los aerogeneradores viene dada por la ley exponencial de Hellman a sus respectivas alturas:

$$v_{17} = 7,25 * \left(\frac{17,375}{30}\right)^{0,25} = 6,32 \text{ m/s}$$

$$v_{21} = 7,25 * \left(\frac{21}{30}\right)^{0,25} = 6,63 \text{ m/s}$$

Donde se ha utilizado un coeficiente de fricción  $\alpha$  ligeramente inferior que en el caso de Leganés dada la menor edificación de la zona y la cercanía al mar.

Utilizando un factor de forma  $k = 2$ , que da lugar a un factor de escala  $A$  igual a 7,131 y 7,481 m/s para los dispositivos de 2,75 y 10 metros de altura respectivamente, se obtienen las siguientes distribuciones de Weibull:

### Distribución de Weibull 17,375 metros de altura

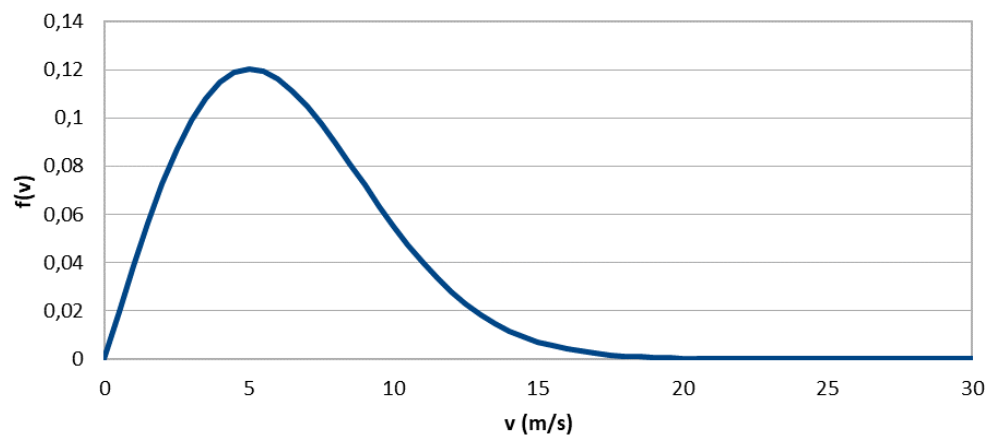


Fig. 4. 26 Distribución de Weibull a 17,375 metros de altura

### Distribución de Weibull 21 metros de altura

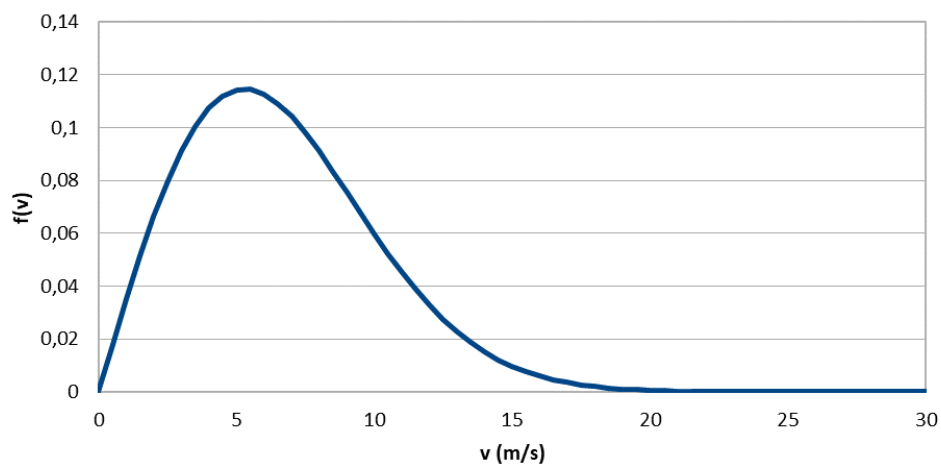


Fig. 4. 27 Distribución de Weibull a 21 metros de altura



Esta distribución, junto con las curvas de potencia de los aerogeneradores, da lugar a una producción anual media de un dispositivo de 2,75 metros de altura de 0,72 MWh y de 13,04 MWh para el de 10 metros.

Usando la herramienta CalcMaps se estima una superficie aproximada de unos 1200 m<sup>2</sup>, la cual al ser dividida entra 1 m<sup>2</sup> para el caso de los aerogeneradores de 2,75 metros de altura y entre 13 m<sup>2</sup> para los de 10 metros, da lugar a 1200 y 92 dispositivos respectivamente, y a una capacidad instalada de 154 KW y 203 KW.

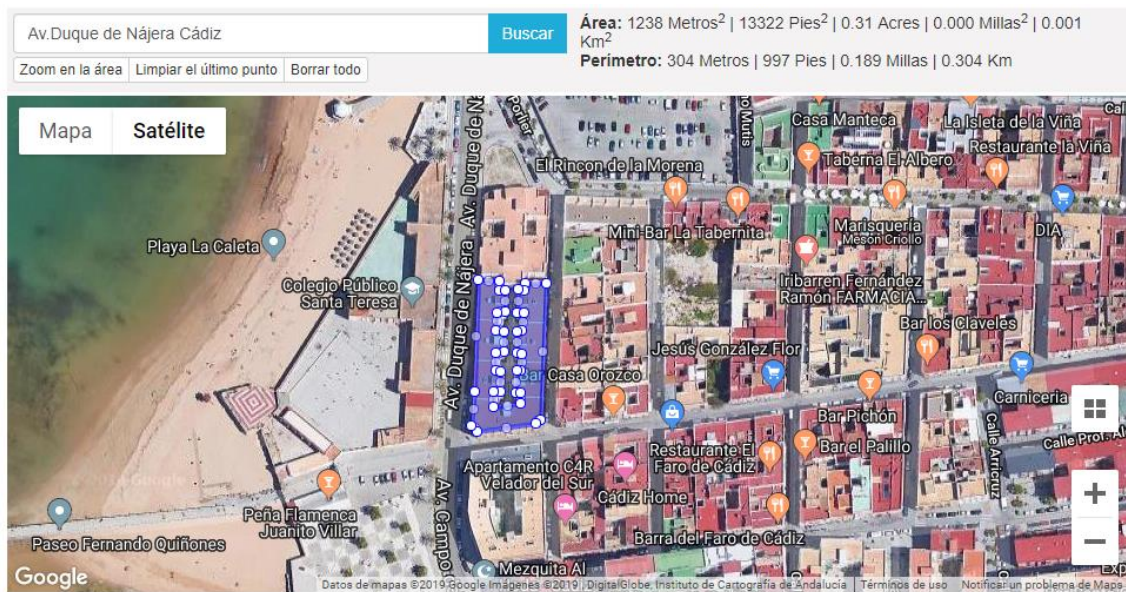


Fig. 4. 28 Toma aérea de la superficie utilizable en Cádiz

Con estas condiciones se estima una producción del campo eólico de 864 MWh si se realizase una instalación de aerogeneradores Vortex Bladeless de 2,75 metros de altura y de 1,2 GWh si, en su defecto, se optase por dispositivos de 10 metros de altura.

## 5) ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las curvas de potencia obtenidas en este estudio muestran valores ligeramente superiores a las estimadas por la empresa. Esto se debe principalmente a la consideración de un funcionamiento ideal y a la existencia de posibles pérdidas en la captación y transmisión de energía que no han sido consideradas en este estudio, y al todavía estado experimental de los dispositivos, por lo que no han sido definidos valores exactos en las curvas de potencia. Ha medida que se avanza en el estudio de esta tecnología se obtiene un mayor rendimiento potencial de la misma. Por ejemplo, en el caso de los aerogeneradores de 2,75 metros de altura, la potencia máxima analizada por Vortex Bladeless era de 100 W y posteriormente alcanzó 102-109 W. Con los parámetros de rendimiento utilizados en este análisis alcanza los 128 W, como se muestra en la siguiente figura:

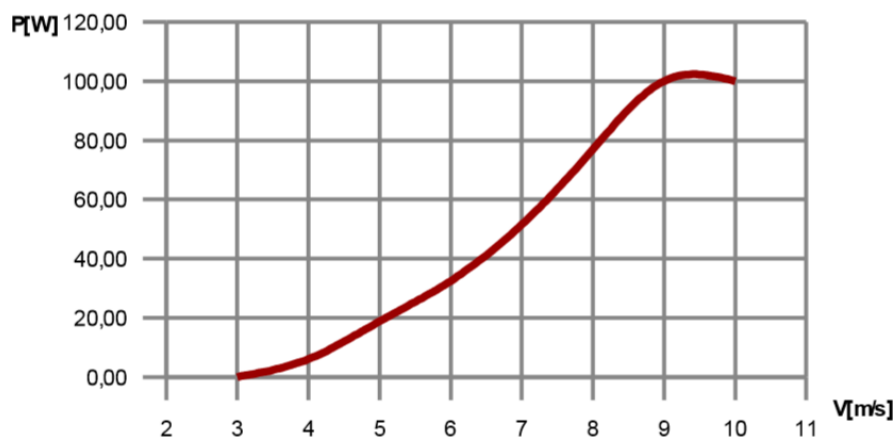


Fig. 5.1 Curva de potencia teórica

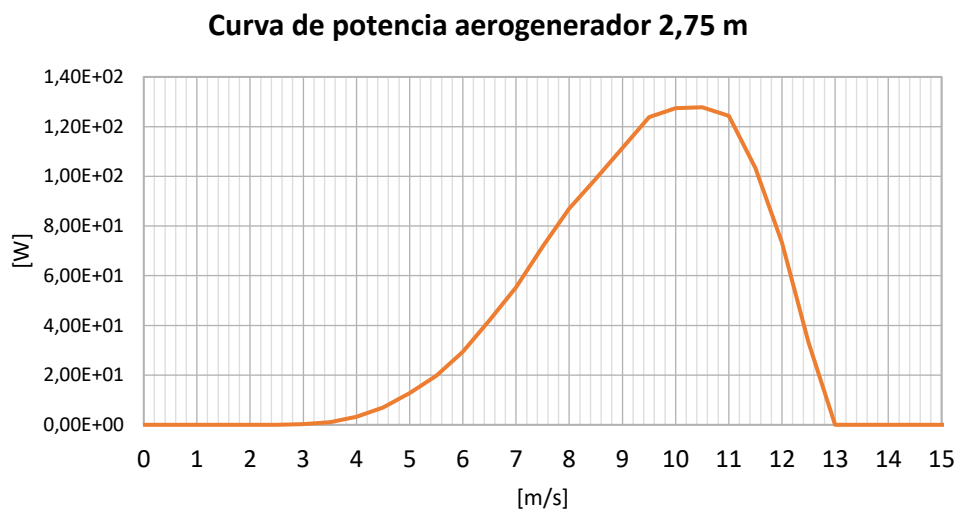


Fig. 5.2 Curva de potencia aerogenerador 2,75 m

El apartado anterior muestra la simulación del funcionamiento de los aerogeneradores estudiados bajo diferentes condiciones geográficas y de altitud, variando así las características del viento al que se ven expuestos.

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para los diferentes escenarios:

*TABLA 5.1 RESULTADOS SIMULACIONES*

	<b>San Nicasio</b>	<b>UC3M</b>	<b>UC3M híbrido</b>	<b>Cádiz</b>
<b>Vortex 2,75 m</b> [MWh/año]	0,35	0,43	X	0,72
<b>Campo eólico</b> <b>(2,75 m)</b>	945 MWh/año	2 GWh/año	2,24 GWh/año	864 MWh/año
<b>Vortex 10 m</b> [MWh/año]	7,32	8,48	X	13,04
<b>Campo eólico</b> <b>(10 m)</b>	1,52 GWh/año	3,05 GWh/año	3,29 GWh/año	1,2 GWh/año

Con los resultados obtenidos en el apartado anterior, es necesario evaluar el impacto de los aerogeneradores Vortex Bladeless tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista medioambiental. De esta forma se analizan los costes de producción y mantenimiento, en el caso económico; y desde la valoración del mix energético actual y la repercusión que puede tener la energía generada con dispositivos Vortex en el ámbito medioambiental.

## **5.1) Análisis económico**

Dado que los dispositivos tratados en este estudio no están comercializados actualmente resulta difícil llevar a cabo un análisis de costes detallado. No hay experiencia previa en mantenimiento de los aerogeneradores ni en el impacto de la producción en serie sobre el coste. Además, que los costes se verán sometido a una gran variación dependiendo de si la instalación se va a realizar de forma asilada o junto con paneles fotovoltaicos, teniendo que adaptar el almacenamiento o la entrada en la red a las especificaciones del resto de equipos.

### **5.1.1) Cálculo de costes**

Los datos sobre costes de producción facilitados por la empresa Vortex Bladeless están referidos a los dispositivos de 10 metros de altura, pero estos datos se consideran suficientes para poder evaluar el LCoE (Levelized Cost of Energy) y poder compararlo con otras tecnologías disponibles en el mercado.

### 5.1.1.1) Operación y mantenimiento

El bajo coste de operación y mantenimiento es una de las fortalezas de esta tecnología. El dimensionado del equipo se realiza de forma que la fatiga de los materiales limite la vida útil del dispositivo. Así, como los paneles fotovoltaicos, el mantenimiento debe ser ejecutado a los elementos expuestos al tiempo y la electrónica. Otros costes relacionados con el seguro, etc. pueden ser superiores a los de los dispositivos convencionales conocidos. La explotación de la tierra (alquiler de la tierra) podría ser más favorable para el dispositivo propuesto dada la mayor densificación esperada de estos aerogeneradores debido a los efectos de la estela.

Lo anterior influye en el LCoE aunque su estimación precisa es complicada. Los costes de operación y mantenimiento en una máquina convencional de gran tamaño son de alrededor de 35 €/ kW instalado / año [29] de los cuales, los relacionados con el mantenimiento podrían cuantificarse en 23 €/ kW instalado / año [30] .De éstos, los costes relacionados con el mantenimiento de superficies y la electrónica pueden ser algo menos del 40%, de modo que el 60% restante representaría un ahorro significativo de 276 € por kW de energía instalada a lo largo de su vida operativa. Este número es obtenido de la estimación de 23 € destinados al mantenimiento multiplicados por el 60% de ahorro estimado y por los 20 años de vida útil del dispositivo.

### 5.1.1.2) Fabricación

Con el objetivo de estimar el coste de producción de los aerogeneradores Vortex Bladeless, se llevará a cabo un análisis de las partes principales con los materiales y dimensiones que las forman teniendo como referencia los dispositivos de 10 metros de altura:

- **Mástil:** Susceptible a ser fabricado por filamento u otros métodos (automatización). Ha sido dimensionado para soportar vientos continuos de 50m/s. Altura: 7,45; diámetro exterior máximo (en su parte inferior): 0,916m; material: resina epoxi y fibra de vidrio unidireccional
- **Columna Flexible:** Elemento hueco y delgado dimensionado de modo que la frecuencia de oscilación natural del dispositivo permite su entrada en funcionamiento a alrededor de 3 m/s de velocidad del viento. Altura: 4.57m; diámetro exterior 0.06m; diámetro interior; 0.055m. El material sobre el cual se han hecho los cálculos es un acero estructural S335.
- **Torre:** soporta el estátor y parte de la electrónica de potencia (rectificado / filtrado). Podría ser de acero estructural. Altura: 4,5m; diámetro exterior: 0,5m. Aplicando el principio de prudencia, se ha seleccionado el acero estructural S275. El uso de acero S335 de mayor calidad o incluso S500 en máquinas convencionales reduce el peso y el precio del equipo.
- **Oscilador:** uno de los elementos más sensibles a la escala. Estará compuesto de uno a varios imanes permanentes (NdFeB) en forma de anillo y cerca de la periferia del mástil.
- **Cobre y hierro eléctrico:** forman el estator del alternador. Que es sostenido por la torre.

- **Soporte:** Su objetivo es más aerodinámico que estructural. Altura 2,5m; diámetro exterior máximo (en su parte más alta): 0,916m; material: resina epoxi y fibra de vidrio.
- **Electrónica de potencia**
- **Base de la estructura:** fabricada con cemento y con analogías a máquinas convencionales u otras estructuras bien conocidas. La estimación mostrada a continuación para la cantidad de cemento necesario se basa en un dado de 83 cm de lado, considerando que la instalación se realiza sobre terreno natural sin cementar.

Sin introducir los costes relacionados con la electrónica y la incertidumbre señalada anteriormente, la estimación aproximada de los costes de los elementos del dispositivo sería:

*TABLA 5.2 MATERIALES Y COSTES*

Elemento	Material	Peso [kg]	Coste del Material [€]
<b>Mástil</b>	Hierro eléctrico y cobre	33,28	41
<b>Columna flexible</b>	Acero S355	16,10	16
<b>Torre</b>	Acero S275	130	29
<b>Soporte</b>	Fibra de vidrio 0°/90° y epoxi	9	18
<b>Oscilador + convertor AC/DC</b>	NdFeB	3	40
<b>Estator</b>	Hierro eléctrico y cobre	6	27
<b>Base + tornillos y fijaciones</b>	Cemento armado	1300	36

Aplicando la producción en masa, el coste de la materia prima de la máquina de 10 metros propuesta sería de unos 207€. También es necesario añadir los costes de fabricación, obras civiles, transporte, instalación, conexión a la red y mantenimiento que en una producción en serie puede representar el 300% del coste del material. Por lo tanto, para un período de vida de 15 a 25 años un coste aproximado sería de 621€.

Este mismo análisis se puede realizar con los aerogeneradores de 2,75 metros de altura. Aplicando los factores de escala correspondientes a los diferentes elementos que conforman el dispositivo de Vortex Bladeless se obtendría un coste de materia prima estimado cercano a 120€, lo que lleva a un coste aproximado con producción en serie de unos 360€.

### 5.1.2) Levelized Cost of Energy (LCoE)

El método del Levelized Cost of Energy (LCOE) permite comparar las centrales eléctricas de diferentes estructuras de generación y coste entre sí. El pensamiento básico se basa en sumar todos los costes acumulados para construir y operar una planta y comparar esta cifra con la suma de la generación anual de energía. Esto da lugar a el llamado LCOE en Euro por kWh. Es importante señalar que este método es una abstracción de la realidad con el objetivo de hacer comparables diferentes tipos de plantas de generación. El método no es adecuado para determinar la rentabilidad de una central eléctrica específica. Para ello, un cálculo de la financiación debe completarse teniendo en cuenta todos los ingresos y gastos sobre la base de un modelo de cash-flow. [31]

El cálculo del LCOE medio se realiza sobre la base del método del valor actual neto, en la que los gastos de inversión y las corrientes de pago de los ingresos y gastos durante la vida útil de la planta se calculan sobre la base del descuento de una fecha de referencia compartida. Los valores en efectivo de todos los gastos se dividen por los valores en efectivo de la generación de energía. Descontar la generación de electricidad parece, a primera vista, incomprensible desde el punto de vista físico, pero es una consecuencia de las transformaciones contables. La idea detrás de ella es, que la energía generada implícitamente corresponde a las ganancias de la venta de esta energía. Cuanto más se desplazan estos ingresos en el futuro, menor es su valor en efectivo. Los gastos totales anuales a lo largo de toda la vida operacional comprenden los gastos de inversión y los gastos de funcionamiento acumulados a lo largo de la vida operacional. Para calcular el LCOE de las plantas nuevas, se aplicará la siguiente expresión: [32]

$$LCoE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}} \quad (27)$$

Donde:

**LCOE** = Levelized Cost of Energy [Euro/kWh]

**I<sub>0</sub>** = Gastos de inversión [Euro]

**A<sub>t</sub>** = Costes totales anuales en el año t [Euro]

**M<sub>t,el</sub>** = Cantidad de energía producida en el año t [kWh]

**i** = Tipo de interés real [%]

**n** = Tiempo de vida operacional [años]

**t** = Año de vida (1, 2, ...n)

Los gastos totales anuales comprenden los gastos fijos y variables de funcionamiento de la planta, mantenimiento, servicios, reparaciones y pagos de seguros. La participación de la financiación externa y de la financiación de capital puede incluirse en el análisis explícitamente a través del coste medio ponderado del capital (WACC) sobre

el factor de descuento (tipo de interés). Depende del importe del capital propio, del rendimiento del capital propio a lo largo de su vida, del coste de la deuda y de la parte de la deuda utilizada.

También es aplicable a la fórmula del LCoE la siguiente estimación de los costes totales anuales:

$$At = \text{Costes de operación fijos} + \text{Costes de operación variables (+ valor residual)}$$

Al descontar todos los gastos y la cantidad de electricidad generada a lo largo de la vida útil hasta la misma fecha de referencia, se garantiza la comparabilidad del LCOE.

El LCOE es, por tanto, un cálculo comparativo sobre una base de costes con la condición necesaria de que el cálculo del LCOE no tenga en cuenta la importancia de la electricidad producida en el sistema energético en una hora determinada del año.

La siguiente tabla muestra los valores utilizados para el cálculo del LCoE utilizando los datos de generación del caso de San Nicasio:

TABLA 5.3 PARÁMETROS LCoE

	10 m	2,75 m
<b>Io</b>	621 €	360 €
<b>At</b>	20,24 €	0,92 €
<b>Mt,el</b>	7320 kWh	350 kWh
<b>n</b>	20 años	20 años

Estos datos, utilizando como referencia el escenario de análisis localizado en San Nicasio, Leganés, da lugar a distintos valores del índice según el tipo de interés:

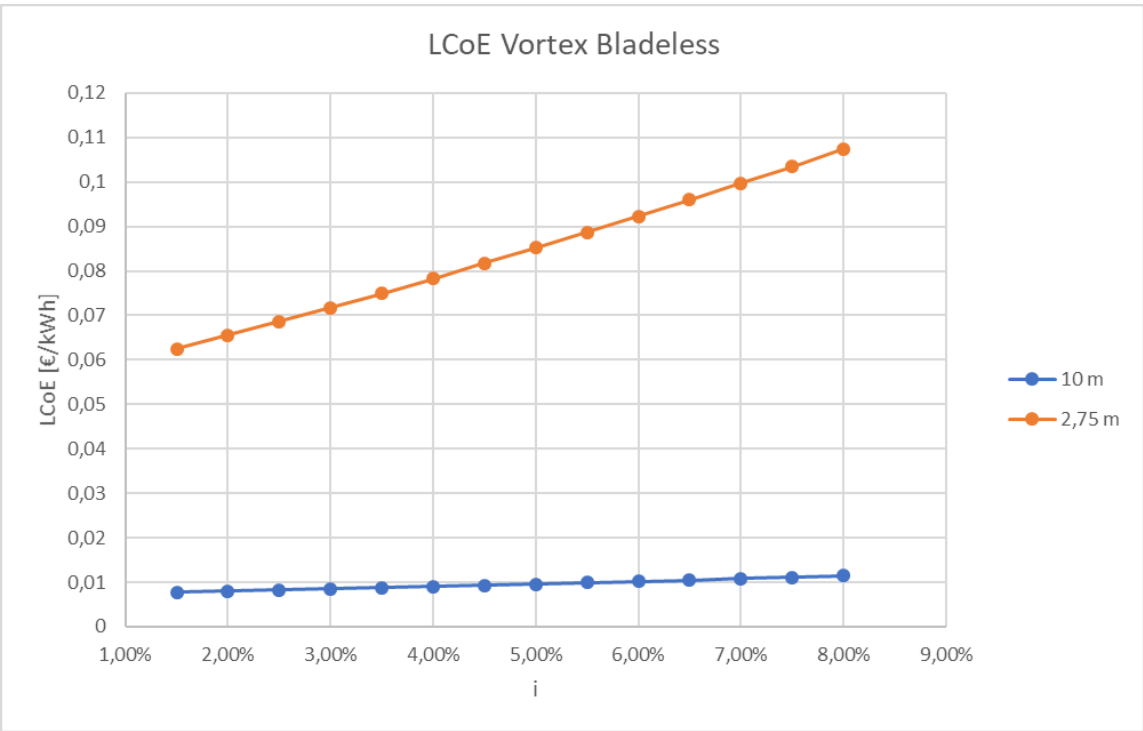


Fig. 5. 3 LCoE dispositivos Vortex Bladeless según el tipo de interés (Escenario San Nicasio)



Se puede apreciar un coste mucho mayor para los dispositivos de menor altura. Esto concuerda con el hecho de que tanto ciertos componentes como el mantenimiento tienen un coste similar al de su homólogo de mayor altura, pero generando menor cantidad de energía.

En el siguiente gráfico se muestra el LCoE de diferentes fuentes de obtención de energía donde se aprecia que el menor coste por kWh producido de energía renovable es el generado a partir de paneles fotovoltaicos o energía eólica onshore. Según las estimaciones realizadas para los dispositivos Vortex Bladeless, el LCoE de los dispositivos de 10 metros de altura ronda 1 céntimo por kWh y el de los aerogeneradores de 2,75 metros los 8 céntimos por kWh. Situándose en un rango competitivo con el resto de renovables del mercado.

Bien es cierto que los costes finales tanto de producción como de mantenimiento podrían variar respecto a las estimaciones mostradas en este estudio. Una vez se haya analizado el funcionamiento de los aerogeneradores Vortex Bladeless durante un período de tiempo lo suficientemente largo en distintas localizaciones y bajo distintas condiciones podrán determinarse sus costes totales de funcionamiento con mayor exactitud. De la misma forma, cuando se ponga en marcha su producción en cadena, se concretará el coste final del producto.

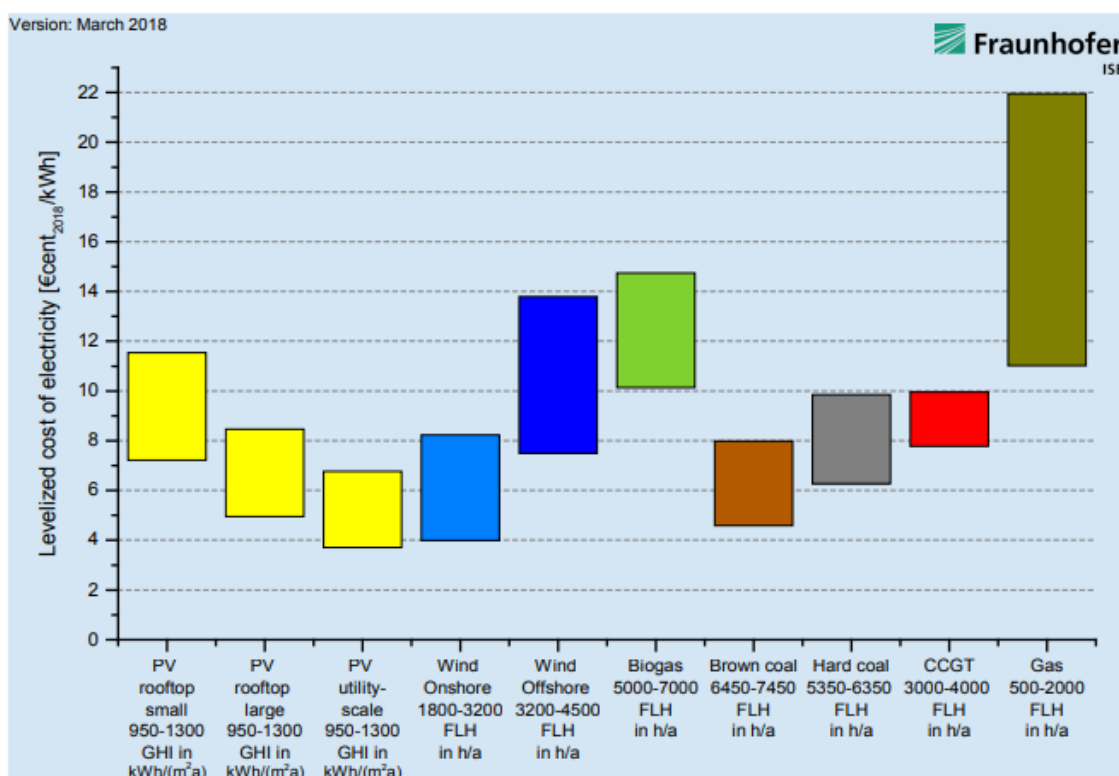


Fig. 5. 4 LCoE de distintas fuentes de energía [33]



## 5.2) Análisis medioambiental

A pesar de que 2016 es el único año de los últimos cuatro en los que las emisiones de CO<sub>2</sub> han bajado en España, en 2018 se ha roto esta tendencia según Red Eléctrica de España (REE), habiendo reducido unos 10 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> respecto al curso anterior. Esto es debido al auge de la energía eólica e hidroeléctrica, en detrimento del ciclo combinado y el carbón. Aun así, el nivel de emisiones es elevado y por ello es importante evaluar la propuesta innovadora de Vortex desde el punto de vista medioambiental.

El impacto ambiental de la tecnología desarrollada por Vortex Bladeless será evaluado llevando a cabo una comparación de la energía producida por los campos eólicos analizados en este documento con el mix eléctrico actual del España mostrado a continuación:

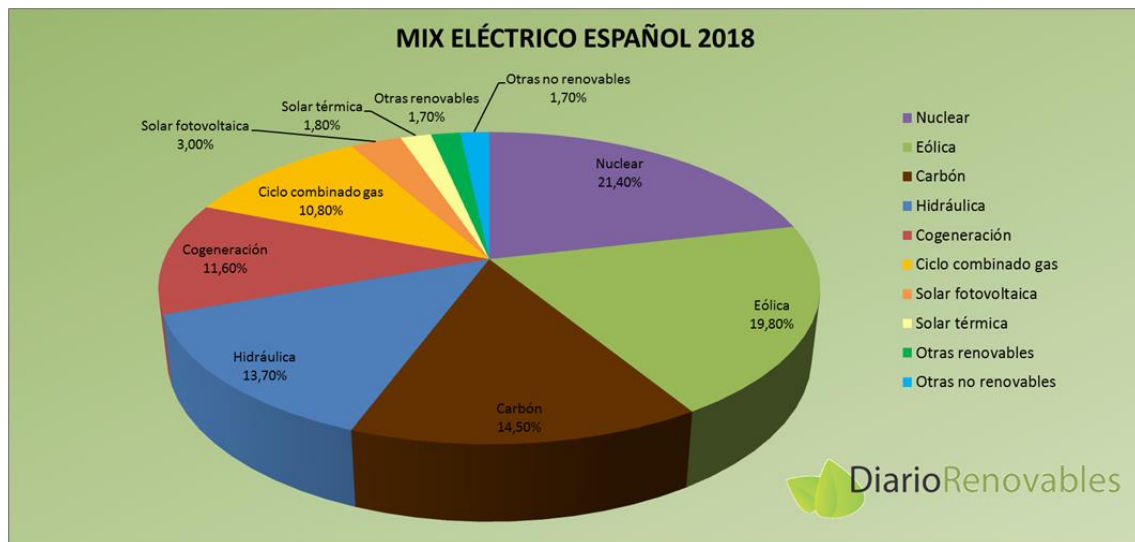


Fig. 5. 5 Mix eléctrico español 2018 [34]

Donde se aprecia un uso bastante repartido entre nuclear y eólica, liderando el mix energético con fuentes de bajas emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, el carbón, la cogeneración y el ciclo combinado siguen representando gran parte del consumo español, provocando emisiones relativamente elevadas. También llama la atención la poca presencia de energía solar, de la cual se prevé un gran aumento especialmente en energía solar fotovoltaica.

Con esta información se pueden evaluar las emisiones teniendo en cuenta la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente que emiten las distintas fuentes de generación. Esta información se puede obtener del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), quién realizó en 2011 un estudio acerca de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para distintas fuentes de generación eléctrica.

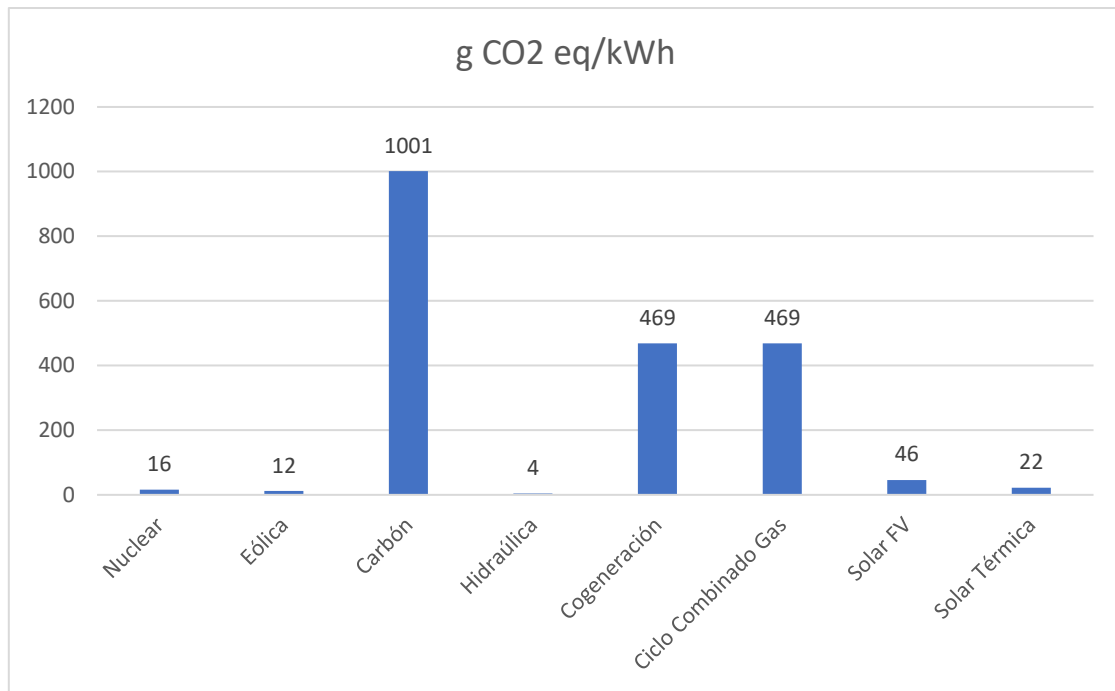


Fig. 5. 6 Emisiones por tipo de fuente de energía [35]

De acuerdo con el mix energético español y las emisiones por kWh de las distintas fuentes de generación de energía, las emisiones del mix al completo serían 258,325 g/kWh. Si se consideran los datos de emisiones de la eólica convencional extrapolables a los dispositivos Vortex Bladeless, cada kWh producido supondría una reducción de emisiones de 246,325 g CO<sub>2</sub> equivalente.

El consumo medio de una vivienda en España ronda los 8 MWh al año en el caso de pisos, y los 17 MWh anuales para viviendas unifamiliares. [36] Por tanto, si el consumo de estos hogares pudiese conseguirse con aerogeneradores Vortex Bladeless, supondría una reducción anual de emisiones de entre 2 y 4 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Evaluando uno de los casos tratados con anterioridad, por ejemplo, en el caso de San Nicasio, la instalación de estos dispositivos supondría una reducción de emisiones de 233 toneladas para el caso de los aerogeneradores de menor tamaño y 374 para los dispositivos de 10 metros.

Esta reducción de emisiones también representa un impacto positivo en los costes de producción, dado que al disminuir las emisiones el gasto por derechos de emisión es menor, como se explica a continuación:

El Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS por sus siglas en inglés) se estableció en 2005 e incluye más de 11.000 instalaciones en todo el Espacio Económico Europeo, que cubren alrededor del 40 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de Europa. Es un sistema de "limitación y comercio", lo que significa que un tope determina la cantidad total de gases de efecto invernadero que las empresas pueden emitir. Bajo el límite anual de reducción, las empresas reciben o compran derechos de emisión con los que pueden comerciar según sea necesario.

El coste actual de una tonelada de CO<sub>2</sub> ronda los 25€, esto retorna a las empresas y consumidores en un ahorro al usar fuentes de energía renovables sin emisiones como los dispositivos de Vortex Bladeless. Además, se estima que las tasas del mercado de derechos de emisiones puedan alcanzar los 50 euros en los inviernos de 2021 y 2022.

Es difícil evaluar la parte de dicho ahorro que repercute en el consumidor por el uso de fuentes renovables, pero este ahorro por derechos de emisión de carbono evita el aumento del precio de la generación de energía y, por tanto, el precio ofrecido en la subasta del mercado diario será más bajo.[37]

## **6) CONCLUSIONES**

El panorama energético internacional apuesta por la reducción de emisiones a través de la electrificación al mismo tiempo que prevé un aumento continuado de la demanda. Esta situación abre paso a las fuentes de energía renovables y a la innovación en el ámbito de la generación eléctrica.

El recurso eólico es difícilmente aprovechable en las zonas urbanas dado el tamaño de los aerogeneradores convencionales y la poca densidad que permiten instalar sus condiciones de funcionamiento. Además, en las zonas urbanas el flujo del viento es mucho más turbulento debido a las interacciones de éste con numerosos obstáculos a lo largo de su recorrido, esto conlleva una caída en el rendimiento de los aerogeneradores convencionales y una menor esperanza de vida debido al efecto de las turbulencias en la fatiga de los materiales, en especial en los elementos mecánicos.

La tecnología desarrollada por Vortex Bladeless hace frente a esta problemática elaborando un dispositivo que trabaja bajo condiciones de turbulencia y cuyo tamaño permite utilizarlo en zonas urbanas. Además, sección circular le permite aprovechar el viento procedente de cualquier dirección, adaptándose de forma rápida a los cambios del mismo.

Este estudio ha analizado tanto los dispositivos de 2,75 metros de altura que están siendo probados en la actualidad, como el prototipo de 10 metros que también están desarrollando. Aunque las aplicaciones de este último serían distintas y su utilización en zonas urbanas variaría dadas las dimensiones, peso y la fijación necesaria para soportar su estructura. A esto hay que añadir su mayor impacto visual y el hecho de que seguramente no se puedan ubicar en los tejados de edificios tal y como se asume en este estudio para su variante de menor tamaño.

Las curvas de potencia obtenidas en este estudio muestran valores ligeramente superiores a las estimadas por la empresa. Esto se debe principalmente a la consideración de un funcionamiento ideal y a la existencia de posibles pérdidas en la captación y transmisión de energía que no han sido consideradas en este estudio, y al todavía estado experimental de los dispositivos, por lo que todavía no hay definidos valores exactos en las curvas de potencia. Por ejemplo, en el caso de los aerogeneradores de 2,75 metros de altura, la potencia máxima analizada por Vortex Bladeless llega a 102-109 W y en este análisis alcanza los 128 W.

Tras el estudio de diferentes escenarios de funcionamiento son obtenidos resultados muy prometedores tanto para los aerogeneradores de 2,75 metros de altura como los de 10. Bien es cierto que las localizaciones y características de las zonas utilizadas se basan en la variante de menor tamaño y los dispositivos de 10 metros deberían ser estudiados en otras localizaciones y con una metodología más similar a la de los molinos de viento convencionales.

La producción estimada en los distintos escenarios da una visión esperanzadora del futuro de esta tecnología. Los resultados de las simulaciones muestran una producción estimada de entre 0,35 y 0,43 MWh anuales por dispositivo de 2,75 metros en el centro de la península (Leganés, Madrid). En el caso de Cádiz, una zona cuyo recurso eólico tiene mucho mayor potencial, su producción anual asciende hasta 0,72 MWh. Además, actualmente la producción anual de pequeños aerogeneradores oscila entre 0,35 y 0,7 MWh, dependiendo si son de tipo HAWT o VAWT y las características de la zona en la

que sean instalados. Estos datos junto con su potencialmente elevada densidad de instalación requiriendo solo 1 metro cuadrado de superficie por dispositivo, señala la posibilidad de que esta tecnología pueda ser implementada en la actualidad.

Los datos obtenidos para los dispositivos de 10 metros de altura, como ya se ha indicado anteriormente, son más difíciles de analizar y han sido incluidos en este estudio con un objetivo simplemente informativo, ya que se basan en numerosas suposiciones como para que los datos obtenidos tengan la suficiente firmeza para ser considerados en futuros estudios. Su producción anual asciende a 7,32 y 8,48 MWh en los casos de Leganés y 13,04 MWh en el caso de Cádiz.

En cuanto al ámbito económico, estos dispositivos presentan su principal ventaja en su bajo coste de mantenimiento que, aunque no se haya comprobado con equipos en funcionamiento actualmente, se estima una vida útil cercana a los 20 años. Esta esperanza de vida se basa principalmente en la ausencia de partes mecánicas móviles que suelen suponer el cuello de botella en cuanto a vida útil y mantenimiento del resto de aerogeneradores del mercado. El LCoE (Levelized Cost of Energy) de esta tecnología se encuentra en torno a 10 céntimos por KWh para los dispositivos de 2,75 metros de altura, siendo competitivo con pequeñas instalaciones fotovoltaicas, pero todavía ligeramente superior al del resto de eólica on-shore. En el caso de su variante de mayor tamaño, los cálculos muestran una gran reducción hasta menos de 2 céntimos por KWh, estando muy por debajo del resto de tecnologías existentes. Aunque estos costes pueden variar en el futuro cuando se finalicen las pruebas de los prototipos que se encuentran en funcionamiento actualmente.

Respecto al punto de vista ambiental, la situación actual de regulación del autoconsumo supone un nuevo escenario de reducción de emisiones al instalar pequeños puntos de generación eléctrica renovable que abastezcan hogares, comunidades o pequeños núcleos urbanos. El impacto de los aerogeneradores de Vortex Bladeless es analizado teniendo en cuenta el ahorro de emisiones que supondrían respecto al mix energético español. Considerando que sus emisiones son similares a las de la eólica convencional, supone unas emisiones de 12 gramos de CO<sub>2</sub> equivalente por KWh producido. Mientras que el mix energético actual de España genera unos 258 gramos de CO<sub>2</sub> equivalente por KWh. Teniendo en cuenta estos datos, cada KWh producido por uno de estos aerogeneradores en lugar de ser obtenido de la red, supondrá un ahorro de 246 gramos de gases de efecto invernadero.

## Bibliografía

- [1] IEA, "2018 World Energy Outlook: Executive Summary," 2018.
- [2] "Power." [Online]. Available: <https://www.iea.org/renewables2018/power/>. [Accessed: 12-Jun-2019].
- [3] Government of Spain, "Comisión de Expertos de Transición Energética," 2018.
- [4] European Commission, "In-depth analysis in support of the Commission Communication COM(2018) 773 A Clean Planet for all," 2018.
- [5] ACARE, "Strategic Research and Innovation Agenda - 2017 update," *Development*, vol. 1, no. June, pp. 26–28, 2014.
- [6] Ministerio para la Transición Ecológica, "Borrador del plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030," *Gob. España*, 2019.
- [7] C. De Madrid, "La Suma de Todos Guía sobre Tecnología Minieólica GUÍA SOBRE TECNOLOGÍA MINIEÓLICA."
- [8] 15/2018 RD ley, "medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.," *boe*, pp. 31–48, 2018.
- [9] E. y T. Ministerio de Industria, *Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica*. 2019, pp. 690–695.
- [10] BOE, *Royal Decree of 5th of April to regulate administrative, technical and economic conditions of the self-consumption of electrical energy by the Spanish Government*. 2019, pp. 35674–35719.
- [11] Vortex bladeless SL, "Cost-effectiveness & feasibility analysis - Vortex Bladeless," 2018. [Online]. Available: <https://vortexbladeless.com/cost-effectiveness-analysis-bladeless/>. [Accessed: 12-Jun-2019].
- [12] K. Y. Billah and R. H. Scanlan, "Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks," *Am. J. Phys.*, vol. 59, no. 2, pp. 118–124, 1991.
- [13] G. E. Siza, I. A. Santos, and S. A. Cáceres Luque, "Estudio y modelamiento de una turbina eólica de eje vertical de pequeña escala," 2014.
- [14] D. J. Yáñez Villarreal, "VIV resonant wind generators," vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [15] E. García Ramírez, "Capítulo 4: Flujo alrededor de un cilindro Septiembre 2005 CAPÍTULO 4 Flujo alrededor de un cilindro 4.1 Introducción."
- [16] Frank M. White, *Mecánica de fluidos computacional*. 2015.
- [17] F. Baelos-Ruedas, C. Angeles-Camacho, and Sebastin, "Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource Assessment in a Region," in *Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment*, 2012.
- [18] Wind-Data and ENCO Energie-Consulting AG, "Windenergie-Daten der Schweiz," -, 2017. [Online]. Available: <https://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=en>. [Accessed: 12-Jun-2019].

- [19] J. Moraleda Mendoza, "Estudio de viabilidad de un parque eólico," p. 139, 2013.
- [20] Á. Ángel Jiménez, "Caracterización turbulencia en la estela de una aeroturbina," 2013.
- [21] T. K. Prasanth and S. Mittal, "Flow-induced oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement at low  $Re$ ," *J. Fluids Struct.*, vol. 25, no. 6, pp. 1029–1048, Aug. 2009.
- [22] I. Borazjani and F. Sotiropoulos, "Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement in the proximity - Wake interference region," *J. Fluid Mech.*, vol. 621, pp. 321–364, Feb. 2009.
- [23] R. J. Jiang, "Flow-induced vibrations of two tandem cylinders in a channel," *Therm. Sci.*, vol. 16, no. 5, pp. 1377–1381, 2012.
- [24] Y. Sha and Y. Wang, "Vortex Induced Vibrations of Finned Cylinders," *J. Hydrodyn.*, vol. 20, no. 2, pp. 195–201, 2008.
- [25] IDAE, "ANÁLISIS DEL RECURSO EÓLICO. ATLAS EÓLICO DE ESPAÑA," 2011.
- [26] "PANELES SOLARES MEDIDAS Y CAPACIDAD -Paneles solares fotovoltaicos.org." [Online]. Available: <https://panelessolaresfotovoltaicos.org/paneles-solares-fotovoltaicos/dimensiones-de-los-paneles-solares/paneles-solares-medidas-y-capacidad-2/>. [Accessed: 12-Jun-2019].
- [27] Ozgur, "What is capacity factor and how do solar and wind energy compare? – Sunmetrix," *SUNMetrix*, 2013. [Online]. Available: <https://sunmetrix.com/what-is-capacity-factor-and-how-does-solar-energy-compare/>. [Accessed: 12-Jun-2019].
- [28] J. M. Sancho Ávila, J. Riesco Martín, C. Jiménez Alonso, M. C. Sánchez De Cos Escuin, J. Montero Cadalso, and M. López Bartolomé, "Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT," *Aemet*, p. 162, 2012.
- [29] I. R. E. A. IRENA, *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*, no. June. 2016.
- [30] T. Stehly, P. Beiter, D. Heimiller, and G. Scott, "2017 Cost of Wind Energy Review," 2017.
- [31] D. Friedman, "Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies Study November 2013 1," *Fraunhofer Inst. Sol. Energy Syst. Ise*, vol. 22, no. 1, pp. 99–131, 2013.
- [32] J. Maderspacher, "Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation," 2017.
- [33] C. Kost *et al.*, "Fraunhofer ISE: Levelized Cost of Electricity - Renewable Energy Technologies, March 2018," *Fraunhofer ISE: Levelized Cost of Electricity - Renewable Energy Technologies, March 2018*, 2018.
- [34] "Generación eléctrica en España 2018: recuperación renovable y descenso en las emisiones | DiarioRenovables | Energías renovables. Eólica, solar, fotovoltaica, baterías, movilidad sostenible." [Online]. Available: [https://www.diariorenovables.com/2019/01/generacion-electrica-en-espana-2018\\_17.html](https://www.diariorenovables.com/2019/01/generacion-electrica-en-espana-2018_17.html). [Accessed: 12-Jun-2019].

- [35] W. Moomaw, P. Burgherr, G. Heath, M. Lenzen, J. Nyboer, and A. Verbruggen, "Annex II: Methodology. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S.," 2011.
- [36] "Consumo eléctrico en casa: cuánto se gasta y cómo ahorrar en luz." [Online]. Available: <https://comparadorluz.com/faq/consumo-medio-electricidad-casa>. [Accessed: 12-Jun-2019].
- [37] "¿Qué son los derechos de emisión de CO2 y por qué están afectando al precio de la luz? | EL BOLETIN," 2019. [Online]. Available: <https://www.elboletin.com/noticia/166908/economia/que-son-los-derechos-de-emision-de-co2-y-por-que-estan-afectando-al-precio-de-la-luz.html>. [Accessed: 12-Jun-2019].



## Anexo A

Código Matlab para el cálculo de la potencia disponible en el viento:

```
Potencia.m  X  +
1  %Area Barrida
2  - factor_escalas= 0.1;
3  - hmax0=100;
4  - h_o0=25.5;
5  - h_max=hmax0*factor_escalas; %Altura máxima tras aplicar el factor de escala
6  - h_o= h_o0*factor_escalas; %Altura inferior del mástil tras factor de escala
7  - d_o= 2*4.618*factor_escalas; %diámetro de la base
8  - hellman=0.16;
9  - a=0.28;
10 - angle = 6; %ángulo de oscilación
11 - syms h
12 - f= (d_o*(h/h_o)^hellman)-(a*(pi/60)*(h-h_o));
13 - A_disp= int(f, h, [h_o h_max]);
14 - A_total= A_disp + ((pi*((h_max-h_o)^2)*angle)/360);
15
16 %Potencia en el aire
17 - v_o=0.5;%Velocidad en la base del mástil
18 - v_med= (v_o + v_o*(h_max/h_o)^hellman)/2; %Velocidad del viento en el mástil
19 - P=0.5*1.225*A_total*v_med^3;%Potencia disponible en el viento
```

## Anexo B

Excel para el cálculo de la producción anual de energía:

A	Parámetro de escala	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Weibull v_ref	A	Función Densidad f(v)	Acumulado F(v)	POT_DISP 2,75	POT_DISP 10	Cp	Curva_Pot 2,75	Curva_Pot 10	E_anual 2,75	E_anual 10	ETOT 2,75 [Mwh/año]	ETOT 10 [Mwh/año]
0	5,337214944	0,034798388	0,0087379	0,00E+00	1,47E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,43	7,438878654
0,5	5,337214944	0,034798388	0,0087379	8,49E-02	1,47E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0		
1	5,337214944	0,067788285	0,0344961	6,79E-01	1,87E+01	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0		
1,5	5,337214944	0,09731694	0,0759476	2,29E+00	3,97E+01	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0		
2	5,337214944	0,122024418	0,1310073	5,43E+00	9,42E+01	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0		
2,5	5,337214944	0,140946188	0,1970052	1,06E+01	1,84E+02	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0		
3	5,337214944	0,153570634	0,2709013	1,83E+01	3,18E+02	0,0125	2,29E-01	3,97E+00	3,08E-01	5,3446833		
3,5	5,337214944	0,159847401	0,3495155	2,91E+01	5,05E+02	0,0375	1,09E+00	1,89E+01	1,53E+00	26,502144		
4	5,337214944	0,160149341	0,429751	4,35E+01	7,53E+02	0,075	3,26E+00	5,65E+01	4,57E+00	79,269554		
4,5	5,337214944	0,155196644	0,5087877	6,19E+01	1,07E+03	0,1125	6,96E+00	1,21E+02	9,47E+00	164,06367		
5	5,337214944	0,145955842	0,5842322	8,49E+01	1,47E+03	0,15	1,27E+01	2,21E+02	1,63E+01	282,20375		
5,5	5,337214944	0,133528156	0,6542123	1,13E+02	1,96E+03	0,175	1,98E+01	3,43E+02	2,31E+01	400,90271		
6	5,337214944	0,119041149	0,7174175	1,47E+02	2,54E+03	0,2	2,93E+01	5,09E+02	3,06E+01	530,29909		
6,5	5,337214944	0,103555206	0,7730877	1,87E+02	3,23E+03	0,225	4,20E+01	7,27E+02	3,81E+01	659,83378		
7	5,337214944	0,087992641	0,820961	2,33E+02	4,04E+03	0,2375	5,53E+01	9,59E+02	4,27E+01	739,16962		
7,5	5,337214944	0,073093091	0,861192	2,87E+02	4,97E+03	0,25	7,16E+01	1,24E+03	4,59E+01	794,95061		
8	5,337214944	0,059394854	0,8942554	3,48E+02	6,03E+03	0,25	8,70E+01	1,51E+03	4,52E+01	783,96886		
8,5	5,337214944	0,047238766	0,9208449	4,17E+02	7,23E+03	0,2375	9,91E+01	1,72E+03	4,10E+01	710,49162		
9	5,337214944	0,036789165	0,9417794	4,95E+02	8,58E+03	0,225	1,11E+02	1,93E+03	3,59E+01	622,25731		
9,5	5,337214944	0,028065698	0,9579223	5,82E+02	1,01E+04	0,2125	1,24E+02	2,14E+03	3,04E+01	527,28525		
10	5,337214944	0,020979933	0,9701184	6,79E+02	1,18E+04	0,1875	1,27E+02	2,21E+03	2,34E+01	405,6443		
10,5	5,337214944	0,015371712	0,9791487	7,88E+02	1,36E+04	0,1625	1,28E+02	2,21E+03	1,72E+01	298,18344		
11	5,337214944	0,011041587	0,9857032	9,04E+02	1,57E+04	0,1375	1,24E+02	2,15E+03	1,20E+01	208,3782		
11,5	5,337214944	0,007777133	0,9903679	1,03E+03	1,79E+04	0,1	1,03E+02	1,79E+03	7,04E+00	121,97002		
12	5,337214944	0,005372332	0,9936235	1,17E+03	2,03E+04	0,0625	7,34E+01	1,27E+03	3,45E+00	59,831052		
12,5	5,337214944	0,003640228	0,9958522	1,33E+03	2,30E+04	0,025	3,32E+01	5,75E+02	1,06E+00	18,328994		
13	5,337214944	0,00241978	0,9973489	1,49E+03	2,59E+04	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0		

## Anexo C

Excel para el cálculo de emisiones del mix energético español:

	<b>Mix energético</b>	<b>CO2 eq</b>	<b>CO2eq mix</b>	
<b>Nuclear</b>	21,40%	16	3,424	
<b>Eólica</b>	19,80%	12	2,376	
<b>Carbón</b>	14,50%	1001	145,145	
<b>Hidráulica</b>	13,70%	4	0,548	
<b>Cogeneración</b>	11,60%	469	54,404	
<b>Ciclo Combinado Gas</b>	10,80%	469	50,652	
<b>Solar FV</b>	3,00%	46	1,38	
<b>Solar Térmica</b>	1,80%	22	0,396	
<b>Total</b>			258,325	g/kWh

## Anexo D

Excel para el cálculo del output de paneles fotovoltaicos:

	Irradiancia [KWh/m <sup>2</sup> día]	Capacity factor	Output mensual [MWh/mes]	
Enero	2,27	13,75%	5,1500625	
Febrero	3,25	16,38%	8,783775	
Marzo	4,65	23,32%	17,89227	
Abril	5,75	26,45%	25,0944375	
Mayo	6,6	28,23%	30,74247	
Junio	7,74	28,77%	36,742167	
Julio	8,04	28,94%	38,391804	
Agosto	7	29,23%	33,76065	
Septiembre	5,47	24,31%	21,9409905	
Octubre	3,56	21,15%	12,42351	
Noviembre	2,43	15,39%	6,1706205	
Diciembre	1,87	15,29%	4,7177295	
Superficie [m <sup>2</sup> ]:	550		Output total [MWh/año]	241,810487